

# **Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dennis Harlacher

aus

Karlsruhe

Referent: Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Tobias Bleninger

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2016



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Kooperation der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe und der Universität Duisburg-Essen (UDE). Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar vom Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) der UDE bedanke ich mich herzlichst für die Übernahme des Hauptreferates, die fachliche Unterstützung und die Freiheit, welche mir bei der Bearbeitung und Durchführung dieser Arbeit eingeräumt wurde. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Tobias Bleninger der Universität in Paraná (UFPR) in Brasilien. Seine menschliche und fachwissenschaftliche Betreuung sowie seine Diskussionsbereitschaft - trotz der Distanz und der Zeitverschiebung - weiß ich sehr zu schätzen. Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann, Leiter der Bundesanstalt für Wasserbau, bedanke ich mich für die Begleitung meines Promotionsverfahrens, die fachliche Unterstützung und die Förderung meiner Arbeit. Durch seine Hinweise erfuhr die praktische Anwendbarkeit meiner Untersuchungen einen deutlichen Mehrwert.

Mein Dank geht an die Kolleginnen und Kollegen des ISMT der UDE für die gute und herzliche Zusammenarbeit. Auch danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich an der BAW für deren Unterstützung und Bereitstellung von Daten, Strömungsmodellen und Informationen sowie im Besonderen den Kolleginnen und Kollegen der Referate „Flussbau“ und „Schiff / Wasserstraße, Naturuntersuchungen“ für die angenehme Zeit und die Diskussionsrunden. Persönlich danken möchte ich Herrn Rolf Zentgraf der BAW für viele fachliche Diskussionen und seine Unterstützung in so mancher Verwaltungsangelegenheit. Ebenso danken möchte ich dem Nautiker meines Vertrauens Igor Alexander der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) - Standort Mainz -. Danken möchte ich auch der Verwaltung der BAW in Sachen Vergabe im Rahmen der Softwareentwicklung sowie dem Team der Bibliothek für deren Unterstützung im Bereich der Literaturrecherche. Frau Nina Wellmann und Herrn Markus Scherer danke ich für ihre ausdauernde Hilfe bei der Auswertung unzähliger Messungen und Berechnungen.

Mein ausdrücklicher Dank geht an meine Lebensgefährtin Nina Weick, welche mich bei der Entstehung der Arbeit stets unterstützt, neu motiviert und an mich geglaubt hat. Meiner Schwester Nadine Daub und Herrn Dieter Weick danke ich für die Übernahme des Lektorats. Meiner Familie und meinem Freundeskreis danke ich für ihr Verständnis und ihre Geduld, besonders bei meinen Eltern bedanke ich mich dafür, dass sie mir das Studium und damit den Weg zur Promotion ermöglicht haben. Ihnen allen widme ich diese Arbeit.





## Kurzfassung

Ein allgemeingültiges oder ganzheitliches Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit existiert nicht. Die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen wird - je nach Fragestellung und Zielsetzung - auf unterschiedliche Weise ermittelt. Ein zentrales Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen analysiert und bewertet werden kann.

Im Rahmen der Dissertation wird die Entwicklung des Verfahrens *RiNA* (*River Navigation Assessment*) zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen aufgezeigt, prototypisch umgesetzt und in Fallstudien am Rhein angewendet. Die Befahrbarkeitsanalyse wird in den Untersuchungen mit verschiedenen Elementen aus unterschiedlichen Fachbereichen charakterisiert, welche aus geometrischen Flusseigenschaften, den Schiffs- bzw. Fahrrinneneigenschaften und den hydraulischen Strömungskenngrößen sowie deren Wechselwirkungen bestehen. Sowohl Binnenschiffahrtinformationsdienste zur Unterstützung der Schifffahrt als auch Verkehrsregeln werden ebenfalls in dem Verfahren mit berücksichtigt.

Das Bewertungsverfahren *RiNA* wurde auf der Basis eines weltweit verbreiteten Geoinformationssystems entwickelt. Nach der Überführung der unterschiedlich komplexen Eingangsdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem werden aus hydraulischen Parametern (z. B. Fließtiefen, Fließgeschwindigkeiten) unter Berücksichtigung nautisch relevanter Kenngrößen (z. B. Tiefgang) sogenannte Einzelpotentiale generiert. Anschließend werden diese Einzelpotentiale durch geeignete Kombinationen in Gesamtpotentiale überführt. Die Gesamtpotentiale stellen eine flächige Verteilung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen dar. Diese Befahrbarkeitspotentiale werden für unterschiedliche Abflussszenarien, Schiffstypen, Veränderung des Tiefgangs, Fahrtrichtung (Berg-/Talfahrt) aufbereitet und mittels aufgezeichneten Schiffsfahrten aus Großausführungsmessungen validiert. Die Einzel- bzw. Gesamtpotentiale werden für den ungestörten Verkehr entwickelt und können zudem durch Berücksichtigung aufgezeichneter Messfahrten für den fließenden Verkehr erweitert werden.

Mit dem Verfahren *RiNA* kann eine objektive Beurteilung und Bewertung von Wasserstraßen nach nautischen Gesichtspunkten (u. a. Fließgeschwindigkeit, Tiefgang, Fahrregeln) durchgeführt sowie kritische Stellen aufgezeigt werden. Anwendungsbeispiele, wie z. B. die Bewertung von Fahrrinnen- bzw. Schiffsabmessungen, die Bewertung und Analyse von Engstellenbereichen oder die Bewertung der Simulationsergebnisse eines Binnenschiffsführungssimulators bzw. hydrodynamisch-numerischer Modelle, sollen mit dem Verfahren bearbeitet werden. Das entwickelte Bewertungsverfahren *RiNA* leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, aus einer Flut von Informationen zentrale Inhalte aufzubereiten, diese gewichtet zu kombinieren und darzustellen. Es bietet eine Plattform für die Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen und trägt dadurch künftig zu einer optimierten Nutzung der Wasserstraßen bei.



## Abstract

Currently, there is no universal or holistic approach to evaluate, assess and visualise the trafficability of navigable areas of inland waterways. The trafficability of inland waterways is determined in various ways, depending on the underlying question and objective. A central aim of this thesis is to demonstrate that the trafficability of inland waterways can be analysed and assessed by a suitable combination of nautical relevant information from several disciplines.

Within the scope of the thesis, the development of the *RiNA* procedure (*River Navigation Assessment*) for the evaluation and assessment of the trafficability of inland waterways and for the visualisation of navigable areas is presented, implemented prototypically and applied in case studies concerning the river Rhine. In the investigations, the analysis of the trafficability is defined by different elements from several disciplines, which comprise the geometric properties of the river and the navigation channel, the vessel characteristics and the flow characteristics as well as their interaction. River information services to support the navigation as well as traffic rules are taken into consideration by the assessment procedure.

The *RiNA* assessment procedure has been developed on the basis of a global geographic information system. After the transmission of the initial data, the complexity of which varies, into a mutual coordinate system, firstly the so-called single potentials are generated from hydraulic parameters (e.g. flow depth, flow velocities), taking into account nautically relevant parameters (e.g. draught). Then, those single potentials are transferred to total potentials by appropriate combinations. The total potentials represent a surface visualisation of the trafficability of inland waterways. These total potentials are prepared regarding different discharge scenarios, types of vessels, changes in the draught, direction (up- / downstream navigation) and then validated, based on recorded passages of vessels. The single and total potentials are developed for undisturbed traffic and can be extended for fluent traffic by taking into consideration recorded vessel passages.

With the *RiNA* procedure, an objective evaluation and assessment of waterways according to nautical criteria (among others flow velocity, draught, traffic rules) can be made and critical points be shown. This procedure shall also be applied to fields like, for example, the evaluation of fairway or vessel dimensions, the assessment and analysis of bottlenecks or the evaluation of the simulation results of an inland ship handling simulator and of hydrodynamic-numerical models, respectively. The *RiNA* assessment procedure developed significantly helps to process essential elements out of a flood of data and information, combine them according to their relevance and to visualise them. It provides a platform for the assessment and evaluation of inland waterways and the surface visualisation of their trafficability which in future leads to an optimized use of the waterways.



## Abkürzungen

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler / Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser
AIS	Automatic Identification System / Automatisches Identifikationssystem
ARGO	Advanced River Navigation / Elektronisches Fahrrinnen-Informationssystem
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; heute BMVI
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; früher BMVBS
BRZ	Bruttoraumzahl
CCNR	Central Commission for the Navigation of the Rhine / siehe ZKR
CFD	Computational Fluid Dynamics / Numerische Strömungssimulation
COG	Center of gravity / Massenschwerpunkt
DGM	Digitales Geländemodell
DoF	Degrees of Freedom / Freiheitsgrade
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System / Elektronisches Kartendarstellungs- und Informationssystem
ELWIS	Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice
ENC	Electronic Navigational Chart / Elektronische Navigationskarte
EPA	Engpassanalyse
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FEM	Finite Elemente Methode
FDM	Finite Differenzen Methode
FME	Feature Manipulation Engine / Programm zur Konvertierung und Bearbeitung von Daten
FVM	Finite Volumen Methode
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, früher WSD
GG	Grundgesetz
GIS	Geoinformationssystem
GIW	Gleichwertiger Wasserstand
GMS	Gütermotorschiff bzw. überlanges Gütermotorschiff (üGMS)
GNS	Good Navigation Status
GPS	Global Positioning System / Globales Positionsbestimmungssystem
HN-Modell	Hydrodynamisch-numerisches Modell
HPC	High Performance Computing / Hochleistungsrechner
HW	Hochwasser
HWM	Hochwassermarke
IHO	International Hydrographic Organization
Inland ECDIS	Electronic Chart Display and Information System für den Binnenbereich
Inland ENC	Inland Electronic Navigational Chart oder IENC / Elektronische Navigationskarte für Binnenschifffahrtsstraßen
KOS	Koordinatensystem

LES	Large Eddy Simulation / Grobstruktursimulation
MIB	Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt
MOVES	Verkehrserfassungssystem
MS	Mitte Schiff
MW	Mittelwasser
NASA	National Aeronautics and Space Administration / Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde
NIF	Zentraler Nautischer Informationsfunk
NW	Niedrigwasser
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses / Technisch-wissenschaftliche Vereinigung des Hafen- und Wasserstraßenbaus und der Schifffahrt
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes equations / Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichungen
RheinSchPV	Rheinschifffahrtspolizeiverordnung
RiNA	River Navigation Assessment / Bewertungsverfahren
RIS	River Information Services / Binnenschifffahrtswasserstraßeninformationssysteme
SV	Schubverband
TDP	Taktischer Drehpunkt
TEN-V	Transeuropäisches Verkehrsnetz
TIN	Trianguliertes, irreguläres Netzwerk
TMS	Tankmotorschiff
UDE	Universität Duisburg-Essen
VBW	Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen
WaStrG	Wasserstraßengesetz
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion; heute GDWS
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt

## Schlagwörter

Befahrbarkeit, Fahrdynamik, Fahrrinne, Fließgewässer, Geodaten, Geoinformationssysteme (GIS), Geschwindigkeiten, Hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle, Inland Electronic Chart Display and Information System (Inland ECDIS), Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC), Navigation, Schifffahrt, Schiffsführungssimulation, Strömungskenngrößen, Potentialentwicklung, Rasterdaten, River Navigation Assessment (RiNA), Vektordaten, Wasserstraßen, Wassertiefen





# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	i
Kurzfassung.....	iii
Abstract .....	v
Abkürzungen.....	vii
Schlagwörter .....	ix
Inhaltsverzeichnis .....	xi
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Veranlassung.....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Fahrdynamik .....	7
2.1.1 Schiffsbewegungen und Kräfte am Schiff im Raum .....	7
2.1.2 Schiffsbewegungen aus Trassierungsverfahren.....	11
2.2 Grundlagen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung .....	20
2.2.1 Modellbildung .....	21
2.2.2 Modellanwendung und Modellanforderungen .....	23
2.2.3 Grundgleichungen der Hydrodynamik.....	25
2.2.4 Modellgüte und Fehlerquellen .....	27
<b>3 Verfahren, Dienste und Untersuchungen zum Thema Befahrbarkeit.....</b>	<b>29</b>
3.1 Klassifizierungssystem für Binnenwasserstraßen.....	31
3.2 Binnenschifffahrtsinformationssysteme.....	32
3.2.1 Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation (Inland ECDIS) .....	33
3.2.2 Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC).....	34
3.3 Fahrdynamische Verfahren im Binnenbereich .....	43
3.3.1 Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs in Kanälen bzw. schwach fließenden Gewässern mit dem Verfahren <i>Trasse</i> .....	43
3.3.2 Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs in fließenden Gewässern und Kursachsengenerierung mit dem Verfahren <i>Petra1D</i> .....	44
3.3.3 Binnenschiffsführungssimulator .....	47

<b>4</b>	<b>Verfahrensentwicklung zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit.....</b>	<b>55</b>
4.1	Ziele und Beschreibung des Verfahrens .....	55
4.2	Abgrenzung zu bestehenden Verfahren .....	58
4.3	Geoinformationssysteme und Informationen zu den Bestandteilen des Bewertungsverfahrens.....	61
4.3.1	Informationen aus der Inland ENC und Zusatzinformationen .....	62
4.3.2	Strömungsinformationen aus hydrodynamisch-numerischen Modellen .....	63
4.3.3	Kenngößen eines Binnenschiffes bzw. Fahrrinnenanforderungen .....	65
4.4	Potentialentwicklung.....	66
4.4.1	Einzelpotentialentwicklung.....	67
4.4.2	Gesamtpotentialentwicklung.....	77
4.5	Validierungsmethoden und Analysefunktionen des Verfahrens.....	81
4.6	Softwaresystem <i>RiNA</i> .....	84
4.6.1	Umsetzung und Architektur .....	84
4.6.2	Aufbau und Struktur .....	88
4.6.3	Berechnungssteuerung und Visualisierung.....	92
4.6.4	Weiterführende Funktionalitäten .....	94
4.6.5	Systemvoraussetzungen .....	95
<b>5</b>	<b>Anwendung des Bewertungsverfahrens.....</b>	<b>97</b>
5.1	Untersuchungsgebiete für die Fallstudien.....	97
5.1.1	Wasserstraßenklassen .....	98
5.1.2	Fahrrinnentiefen und -breiten .....	99
5.1.3	Krümmungsradien.....	100
5.1.4	Strömungsinformationen.....	101
5.1.5	Naturmessungen von Schiffsfahrten.....	105
5.2	Fallstudien und Analysen am Ober- bzw. Mittelrhein .....	107
5.2.1	Potentialentwicklung .....	108
5.2.2	Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten.....	111
5.2.3	Variation des Tiefenanspruches.....	116
5.2.4	Variation der Geschwindigkeitsgrenze .....	118
5.2.5	Analyse des Verlassens der Fahrrinne aufgezeichneter Schiffsfahrten .....	119
5.2.6	Untersuchung der Fahrrinnenteilung am Geisenrücken .....	121
5.2.7	Berücksichtigung von Brücken in der Potentialentwicklung .....	122
5.2.8	Berücksichtigung von Querströmungen in der Potentialentwicklung.....	124
5.2.9	Befahrbarkeitspotentiale in der Inland ENC .....	129
5.3	Fallstudien und Analysen am Niederrhein.....	135
5.3.1	Potentialentwicklung .....	135

---

5.3.2	Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten.....	137
5.3.3	Entwicklung einer Basisleitlinie basierend auf einem Gesamtpotential.....	140
5.3.4	Entwicklung von Anpassungsfunktionen aus Schiffsfahrten .....	142
5.3.5	Ableitung der Schiffsphasen, Schleppflächen und Fahrspurbreiten.....	146
5.3.6	Potentialentwicklung im fließenden Verkehr .....	149
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>153</b>
	<b>Literaturquellen.....</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
	<b>Anhang 1: Klassifizierung der Binnenwasserstraßen.....</b>	<b>XV</b>
	<b>Anhang 2: Grundgleichungen der Hydrodynamik .....</b>	<b>XVII</b>
	<b>Anhang 3: Inland ENC Objektliste .....</b>	<b>XXXIX</b>
	<b>Anhang 4: Güterverkehrsdichte 2000 .....</b>	<b>XLI</b>
	<b>Anhang 5: Driftwinkel-Radiusbeziehung am Niederrhein .....</b>	<b>XLIII</b>
	<b>Anhang 6: Driftwinkel-Radiusbeziehung am Ober- bzw. Mittelrhein.....</b>	<b>LV</b>



# 1 Einleitung

Die Einleitung gliedert sich in Veranlassung sowie Zielsetzung und Aufbau der Arbeit. Die Veranlassung macht deutlich, dass bei einer Unterhaltung der Binnenwasserstraßen unterschiedliche Belange und Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Um die Leistungsfähigkeit einer Wasserstraße langfristig zu erhalten bzw. zu erhöhen, müssen geeignete Simulationsverfahren und Werkzeuge entwickelt werden, welche die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen ermitteln. Die Zielsetzung beschreibt die Verfahrensentwicklung, die Validierung und die Anwendungsmöglichkeiten und stellt dar, wie die Befahrbarkeitsanalyse im Rahmen der Dissertation mit interdisziplinären Elementen aus unterschiedlichen Fachbereichen bestimmt wird. Zudem wird der Aufbau der Arbeit erläutert.

## 1.1 Veranlassung

Wasserstraßen gelten nicht nur im Transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-V) als unentbehrliche Verkehrsträger. Sondern stehen auch weltweit für einen vergleichsweise kostengünstigen und ökologisch verträglichen Transport von Gütern. Neben der bedeutenden Transportfunktion für die Schifffahrt, dienen die Binnenwasserstraßen u. a. der Wasserversorgung, der Abwasserentsorgung, der Energiegewinnung, der Bewässerung, der Hochwasser- und der Eisabfuhr, der Fischerei, als Biotope, aber auch der Naherholung, dem Personentransport und als Freizeitraum für den Menschen. Diese verschiedenen Nutzungsarten bzw. Funktionen unterliegen jeweils eigenen Anforderungen und Ansprüchen von Ländern, Kommunen und Unternehmen.

Das Bundeswasserstraßennetz Deutschlands mit seinen ca. 7.300 km Binnenwasserstraßen und rund 23.000 km<sup>2</sup> Seewasserstraßen ist eingebunden in das Transeuropäische Verkehrsnetz der Transportwege auf dem Wasser und dient der nationalen und internationalen Schifffahrt als leistungsfähiger, sicherer und umweltfreundlicher Verkehrsträger. Die Binnenwasserstraßen teilen sich auf in etwa 75 % Flüsse und 25 % Kanalstrecken. Der Transport von Gütern auf Binnenwasserstraßen ist nicht nur wegen der Energieeffizienz und der Umweltverträglichkeit empfehlenswert, sondern im Vergleich zum Gütertransport auf der Straße deutlich sicherer. Auf den deutschen Bundeswasserstraßen werden jährlich Gütermengen von rund 230 Millionen Tonnen transportiert, das sind monatlich zwischen 17 und 20 Millionen Tonnen (*Statistisches Bundesamt, 2015 [77]; BMVI, 2014 [13]*). Etwa 193 Millionen transportierte Tonnen und somit rund 85 % der transportierten Gütermenge entfallen dabei auf die wichtigste Verkehrsader Deutschlands, den Rhein (*Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V., 2015 [18]; Anhang 4*).

Für das Jahr 2030 ist das Güterverkehrsaufkommen in der deutschen Binnenschifffahrt auf etwa 275,6 Millionen Tonnen prognostiziert (*Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al., 2014 [19]; BMVI, 2016 [15]*). Um dem prognostizierten Güterverkehrsaufkommen in der deutschen Binnenschifffahrt

gerecht zu werden und gegenüber anderen Verkehrsträgern<sup>1</sup>, wie Straßen- und Schienengüterverkehr, konkurrenzfähig zu sein, gibt es Bestrebungen, die Nutzung der Wasserstraßen hinsichtlich der Transportkapazität stetig zu verbessern. Die Leistungsfähigkeit einer Wasserstraße ist geprägt durch natürliche Einflussfaktoren (z. B. Hydrologie, Gewässergeometrie, Hydraulik etc.) und anthropogene Einflussfaktoren (z. B. Regelungsbauwerke, Schiffstypen, Motorisierung, Binnenschifffahrtsinformationssysteme, Menschliches Verhalten etc.). Die notwendigen Voraussetzungen und Anforderungen müssen gegeben sein, um eine Leistung, wie den Transport von Gütern in der Binnenschifffahrt, langfristig und stabil vorzuhalten.

Zum einen wird versucht, die Wirtschaftlichkeit in der Binnenschifffahrt durch größere Schiffe (größere Transportkapazität), bessere Schiffsausrüstung (leistungsfähigere Manövrierorgane) und Bereitstellung von Binnenschifffahrtsinformationssystemen, sogenannten „River Information Services“ (RIS), zu erhöhen. Zur verkehrstechnischen Optimierung des Systems Schiff / Wasserstraße sowie zur Verbesserung der Verkehrssicherungspflicht, wurden bereits einige Telematikanwendungen bzw. Dienste, so z. B. das „Electronic Chart Display and Information System“ für den Binnenbereich (Inland ECDIS), die „Inland Electronic Navigational Chart“ (Inland ENC) (Hecht et al., 1999 [44] und 2009 [45]) und das Elektronische Fahrrinnen-Informationssystem (Advanced River Navigation - ARGO) (WSV, 2003 [82]), entwickelt.

Zum anderen hängt der wirtschaftliche Betrieb von natürlichen Einflussfaktoren wie der Hydrologie und somit von dem Abflusszustand (Niedrig- bis Hochwasser) und der Gewässergeometrie ab. Eine wesentliche Anforderung der Binnenschifffahrt an eine leistungsfähige Binnenwasserstraße ist eine an den zugelassenen Schiffsverkehr (Klassifizierungssystem für Binnenwasserstraßen<sup>2</sup>) angepasste Trassierung der Fahrrinne mit ausreichender Breite und Tiefe (WSV, 2007 [83]), welche einen sicheren, leichten und wirtschaftlichen Betrieb über das Jahr hinweg - auch in Niedrigwasserperioden - ermöglicht. Eine ausreichende Breite und Tiefe der Fahrrinne sollte trotz veränderlichen Randbedingungen über möglichst große Streckenabschnitte bis hin über das gesamte Wasserstraßennetz für die Schifffahrt vorgehalten werden.

Durch flussbauliche Eingriffe, wie z. B. am Rhein, der Bau und die Unterhaltung von Regelungsbauwerken (z. B. Buhnen und Parallelwerke), wird die nutzbare Fließtiefe erhöht und dadurch die Befahrbarkeit einer Wasserstraße besonders in Niedrig- und Mittelwasserperioden verbessert. Andererseits müssen - trotz einer intensivierten Nutzung - die erforderliche Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs eingehalten sowie die schiffsinduzierten Beeinträchtigungen der Wasserstraße minimiert werden. Gleichzeitig müssen die eingangs genannten Nutzungsarten und Ansprüche, wie z. B. Hochwasserschutz und Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines natürlichen Flussregimes, aber auch die Transportfunktion der Binnenschifffahrt gewährleistet werden. So ist z. B. im deutschen Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG) beschrieben, wie die Unterhaltung der Binnenwasserstraßen zum einen die Erhaltung eines ordnungsgemäßen Zustandes für den Wasserabfluss und zum anderen die Erhaltung der Schiffbarkeit umfasst (WaStrG, Abschnitt 4 § 8

---

<sup>1</sup> <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/314702/umfrage/gueterverkehrsleistung-entwicklung-nach-verkehrszweig/> abgerufen am 01.08.2016

<sup>2</sup> [http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg\\_rhein/technische\\_daten/Wasserstrassenklasse.html](http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg_rhein/technische_daten/Wasserstrassenklasse.html) abgerufen am 01.08.2016

*Absatz 1, 1968 [17]).* Um z. B. die Befahrbarkeit einer Wasserstraße abschätzen und bewerten zu können, müssen die ausschlaggebenden natürlichen Einflussfaktoren erfasst und mit den schifffahrtsrelevanten, anthropogenen Einflussfaktoren in Korrelation gebracht werden.

Die deutschen Bundeswasserstraßen werden durch eigene Behörden des Bundes verwaltet (*Grundgesetz GG, Artikel 89 Absatz 2, 1949 [39]*). Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ist zuständig für die Verwaltung der Wasserstraßen und die Regelung des Schiffsverkehrs. Der WSV obliegt die Daueraufgabe: *„den für den durchgehenden Schiffsverkehr zur Verfügung gestellten Verkehrsweg im Rahmen des Möglichen und Zumutbaren zu sichern“.* *„Die WSV hat dafür zu sorgen, dass dieser die für die zugelassene Schifffahrt erforderliche Breite und Tiefe besitzt, dass er frei von Hindernissen ist und, soweit erforderlich, genügend gekennzeichnet ist.“* (WSV, 2007 [83]). Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist zentraler Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des Ministeriums und der WSV im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben. Innerhalb einer Kooperation der Universität Duisburg-Essen (UDE) und der BAW in Karlsruhe wurden die Thematik der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen und deren flächige Visualisierung als Bewertungsgrundlage für u. a. Schiffsfahrten und Fahrrinnenabmessungen untersucht.

Bestehende Verfahren sind für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen nicht geeignet und berücksichtigen z. T. die Strömungsinformationen nicht oder nur in reduzierter Form auf eine Hauptströmungsrichtung, und sind daher z. B. für eine detaillierte Engstellenanalyse nicht ausreichend. Für die Bewertung von Schiffs- bzw. Fahrrinnenabmessungen existieren Verfahren, wie z. B. Untersuchungen mit einem Binnenschiffsführungssimulator, allerdings beschränken sich die Untersuchungen meist auf kleinräumige Gebiete und sind äußerst aufwändig. Ein Vergleich von Simulationsfahrten wird hier u. a. auf Basis von Kräften und Momenten, Drehzahlen, Ruderwinkeln und -aktivitäten, Bahnkurven und Abständen durchgeführt. Eine objektive Analyse und Beurteilung von Simulationsfahrten oder Fahrten aus Großausführungsmessungen auf Basis hydrodynamisch-numerischer Kenngrößen unter Berücksichtigung nautisch relevanter Informationen wäre ein Fortschritt und eine Bereicherung bestehender Verfahren.

Um die Leistungsfähigkeit von Wasserstraßen langfristig zu erhalten bzw. zu erhöhen, müssen veränderliche Faktoren wie Verkehrsentwicklung, Abfluss- und Strömungsverhältnisse, Klimawandel, Feststofftransport, zunehmende Schiffsabmessungen etc. berücksichtigt und geeignete Unterhaltungs- und Ausbauplanungen bereitgestellt werden. Eine Ermittlung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen ist durch die sich stetig verändernden Randbedingungen und Anforderungen eine immer wiederkehrende Fragestellung. Diese Daueraufgabe muss durch geeignete Werkzeuge und Simulationsverfahren unterstützt werden.

### 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ein allgemeingültiges Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen existiert nicht. Die Befahrbarkeit einer Wasserstraße wird - je nach Fragestellung und Zielsetzung - auf unterschiedliche Weise ermittelt. Dies kann durch Naturuntersuchungen, Messungen im Labor, Anwendung fahrdynamischer und hydrodynamisch-numerischer Verfahren oder durch den Einsatz unterstützender Systeme auf den Schiffen, wie die Binnenschifffahrtsinformationsdienste sowie kombinierte Ansätze und Verfahren erfolgen. Je nach Anforderungen an die Wasserstraßen wurden so im Laufe der Zeit unterschiedliche Verfahren entwickelt, um die Frage- und Problemstellungen an den Wasserstraßen lösen zu können.

Hydrodynamisch-numerische Modelle zur Simulation der Strömung in Gewässern und fahrdynamische Modellverfahren u. a. zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs sind bei der Bearbeitung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen längst nicht mehr wegzudenken. Für die Beurteilung und Bewertung von Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen sind in der Ingenieurspraxis hochaufgelöste Modelle zur zeitlichen und räumlichen Simulation der Strömung und ggf. des Feststofftransportes weit verbreitet. Fahrdynamische Modellverfahren, z. B. zur Bestimmung der erforderlichen Fahrspurbreite, haben in den vergangenen Jahrzehnten eine Entwicklung durchlaufen, von einer einfachen geometrischen Abschätzung in Kanälen bis hin zu immer komplexeren und aufwändigeren Verfahren, welche die Flussgeometrie, die Strömungskenngrößen in Fließgewässern sowie die Fahrdynamik eines Schiffes berücksichtigen (*Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e. V.*, 2013 [79] und 2014 [80]; BAW, 2014 [8]).

Kapitel 2 fasst die theoretischen Grundlagen der unterschiedlichen Fachbereiche Fahrdynamik und der hydrodynamisch-numerischen Modellierung zusammen. Bei den Grundlagen der Fahrdynamik werden die Schiffsbewegungen durch Kräfte am Schiff im Raum beschrieben sowie aus Trassierungsverfahren vereinfacht dargestellt. Die wasserbaulich geprägten Kapitel befassen sich mit der Ermittlung der Strömungskenngrößen in offenen Gerinnen mit freier Oberfläche basierend auf den Grundlagen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung.

Kapitel 3 beschreibt bestehende Verfahren, Dienste und Untersuchungen zum Thema Befahrbarkeit sowie deren Anwendungsbereiche. Diese Verfahren haben sich aus unterschiedlichen Randbedingungen und Fragestellungen an den Wasserstraßen entwickelt. Die Übersicht reicht von dem europäischen Klassifizierungssystem für die Binnenschifffahrt über Binnenschifffahrtsinformationsdienste zur Unterstützung des Schiffsführers bei der Navigation bis hin zu etablierten fahrdynamischen Verfahren u. a. zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs.

Ein zentrales Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen, die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen analysiert werden kann. Im Rahmen der Dissertation wird die Entwicklung eines Verfahrens *RiNA* (*River Navigation Assessment*) zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen aufgezeigt, prototypisch umgesetzt (Kapitel 4) und erstmals in Fallstudien am Rhein angewendet (Kapitel 5). Die Befahrbarkeitsanalyse wird in den Untersuchungen mit verschiedenen Elementen aus unterschiedlichen Fachbereichen charakterisiert,



welche aus geometrischen Flusseigenschaften, den Schiffs- bzw. Fahrrinneneigenschaften und den hydraulischen Strömungskenngrößen sowie deren Wechselwirkungen bestehen. Sowohl Binnenschifffahrtsweginformationssysteme zur Unterstützung der Schifffahrt als auch Verkehrsregeln werden in dem Verfahren mit berücksichtigt.

Die Informationen aus den Fachbereichen werden in dem Verfahren *RiNA* interdisziplinär eingesetzt, aufbereitet und ergänzt, sodass diese durch geeignete Kombination einer Bewertung unterzogen werden können. Die Validierung des Verfahrens erfolgt auf Basis aufgezeichneter Messfahrten verschiedener Binnenschiffstypen auf charakteristischen Streckenabschnitten des Rheins bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen. Die sogenannten Befahrbarkeitspotentiale werden für den ungestörten Verkehr bei stationärem Abfluss entwickelt. Die Aufbereitung, Verarbeitung und Kombination der unterschiedlichen, interdisziplinären Eingangsdaten sowie der Berechnungsprozess zur Erstellung der Befahrbarkeitspotentiale und die anschließende Analyse der Ergebnisse sind mit zahlreichen Zwischenschritten äußerst aufwändig. Diese bedürfen Unterstützung durch eine Softwareentwicklung, für die ein agiles Vorgehensmodell gewählt wurde. Die Entwicklung des Bewertungsverfahrens mündete in einer Fachschale auf einem weltweit verbreiteten Geoinformationssystem. Neben der Verfahrensbeschreibung, dessen Umsetzung und Validierungsmethoden sind die Ziele des Verfahrens und die Abgrenzung des Verfahrens zu bestehenden Verfahren wesentliche Inhalte des Kapitels 4.

In Kapitel 5 wird anhand ausgewählter Fallstudien am Ober- bzw. Mittelrhein und Niederrhein das Verfahren *RiNA* mit aufgezeichneten Schiffsfahrten validiert sowie Anwendungsbereiche und Auswertemöglichkeiten vorgestellt. Eingangs werden hierfür die Untersuchungsgebiete hinsichtlich zur Verfügung stehender Naturmessungen von Schiffsfahrten, Strömungsinformationen aus den hydrodynamisch-numerischen Modellen und relevanter Eigenschaften des Gewässers beschrieben. In den Fallstudien wird zudem aufgezeigt, wie das Verfahren *RiNA* bei der Entwicklung der Befahrbarkeitspotentiale für den ungestörten Verkehr unter Berücksichtigung analysierter Großausführungsmessungen für den fließenden Verkehr erweitert werden kann. Es wird weiterhin dargelegt, wie das mit dem Bewertungsverfahren entwickelte Befahrbarkeitspotential exemplarisch in den elektronischen Navigationskarten visualisiert und den Schiffsführern zur Unterstützung bei der Navigation bereitgestellt werden kann.

Mit dem Verfahren *RiNA* kann eine objektive Beurteilung und Bewertung der Wasserstraßen nach nautischen Gesichtspunkten (u. a. Fließgeschwindigkeit, Tiefgang, Schiffsgeschwindigkeit, Fahrrinnenbreite) durchgeführt sowie kritische Stellen aufgezeigt werden und dadurch zu einer optimierten Nutzung der Wasserstraßen beitragen. Anwendungsbeispiele, wie z. B. die Bewertung von Fahrrinnen- bzw. Schiffsabmessungen, die Bewertung und Analyse von Engstellenbereichen oder die Bewertung der Simulationsergebnisse eines Binnenschiffsführungssimulators bzw. hydrodynamisch-numerischer Modelle, sollen mit dem Verfahren bearbeitet werden.

Im Straßenverkehr haben Fahrerassistenzsysteme (FAS) längst Einzug gehalten und werden stets weiterentwickelt und verbessert. Auf den Wasserstraßen sind die FAS nicht so ausgeprägt und umfangreich. Die Befahrbarkeitspotentiale aus dem Bewertungsverfahren stellen eine Grundlage für

die Entwicklung weiterer Fahrerassistenzsysteme im Binnenbereich zur Steigerung der Sicherheit und Leichtigkeit, aber auch zur Erhöhung der Ökonomie dar. Das entwickelte Bewertungsverfahren *RiNA* leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, aus einer Flut von Informationen zentrale Inhalte aufzubereiten, diese gewichtet zu kombinieren und darzustellen. Es bietet eine Plattform für die Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen und trägt somit zu einer Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse bei. Die Arbeit wird durch ein zusammenfassendes Kapitel 6 mit einem entsprechenden Ausblick abgerundet.

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Bearbeitung flussbaulicher und verkehrswasserbaulicher Fragestellungen erfordert mit den stetig wachsenden Ansprüchen an die Leistungsfähigkeit einer Wasserstraße eine interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachbereiche. Zentrale Bestandteile für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit zur Beurteilung und Bewertung von Binnenwasserstraßen ist eine Kombination hydraulischer und fahrdynamischer Kenngrößen. Daher behandelt Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Fahrdynamik und der hydrodynamisch-numerischen Modellierung von Strömungen in offenen Gerinnen mit freier Oberfläche wie in Flüssen oder Kanälen. Die Grundlagen der Fahrdynamik eines Schiffes, die von vereinfachten Ansätzen und Kenngrößen bis hin zur allgemeinen Beschreibung der Schiffsbewegungen durch komplexe Bewegungsgleichungen reicht, werden in Kapitel 2.1 dargestellt. Die hydraulischen Strömungskenngrößen werden in Kapitel 2.2 durch Beschreibung der allgemeinen Grundlagen zur hydrodynamisch-numerischen Modellierung von Strömungen vorgestellt.

### 2.1 Grundlagen der Fahrdynamik

Die Lösung der allgemeinen Bewegungsgleichungen zur Beschreibung von Schiffsbewegungen in einer ungleichförmigen und instationären Fließgewässerströmung ist trotz der rasant gestiegenen Rechenressourcen bei hoher Auflösung des numerischen Modells zur Schiffsumströmung noch relativ zeit- und kostenaufwändig. Mit zunehmender Genauigkeit und Datendichte beschränkt sich das Modellgebiet in der räumlichen Ausdehnung auf wenige Kilometer. Neben der Weiterentwicklung numerischer Verfahren ist die Durchführung von Natur- und Modellversuchen zur Identifikation der Koeffizienten und Validierung der Modelle, aber auch zur Entwicklung und Verbesserung oftmals empirischer Formeln zur vereinfachten Abschätzung von z. B. Geschwindigkeiten, Squat, Fahrspurbreiten etc. unabdingbar. Kapitel 2.1.1 befasst sich allgemein mit den Schiffsbewegungen und den Kräften am Schiff im Raum. Kapitel 2.1.2 behandelt die Schiffsbewegungen aus Trassierungsverfahren zur Bestimmung der Fahrspurbreiten bei der Geradeaus- und Kurvenfahrt.

#### 2.1.1 Schiffsbewegungen und Kräfte am Schiff im Raum

##### 2.1.1.1 Schiffsbewegungen und Definition des Koordinatensystems

Betrachtet man ein Schiff als starren Körper konstanter Masse so kann dieses Bewegungen mit 6 Freiheitsgraden (DoF - Degrees of Freedom) ausführen (siehe Abbildung 2-1). Diese umfassen die translatorischen Bewegungen in den drei Raumrichtungen, also Bewegung voraus (entlang der  $x$ -Achse des schiffsfesten Koordinatensystems), seitlich (entlang der  $y$ -Achse des schiffsfesten Koordinatensystems) und entlang der Hochachse ( $z$ -Achse des schiffsfesten Koordinatensystems). Des Weiteren umfasst es die Drehbewegungen um diese drei Achsen des schiffsfesten Koordinatensystems (Drehung um die  $x$ -Achse; Drehung um die  $y$ -Achse und Drehung um die  $z$ -Achse). Der Massenschwerpunkt des Schiffes ist in der Abbildung als *COG* (center of gravity) bezeichnet.

## 2 Theoretische Grundlagen

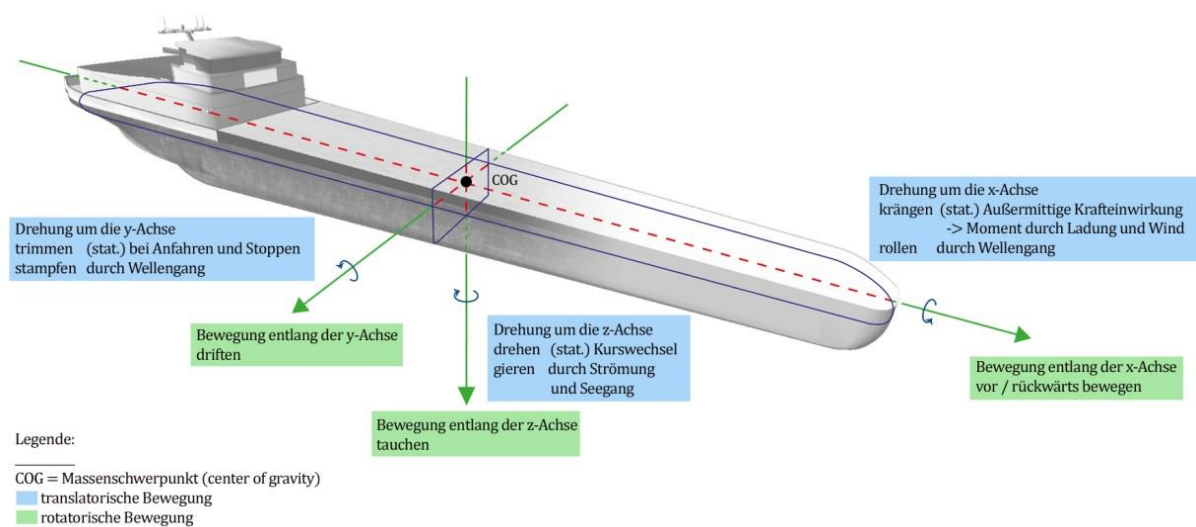


Abbildung 2-1: Freiheitsgrade eines starren Schiffskörpers im schiffsfesten Koordinatensystem

Die Schiffsgeschwindigkeiten  $\vec{V}_S$  und die auf ein Schiff wirkenden Kräfte und Momente werden exemplarisch in einem schiffsfesten Koordinatensystem  $(x, y, z)$  beschrieben (siehe Abbildung 2-2). Das erdfeste Koordinatensystem  $(x_0, y_0, z_0)$  beschreibt die Lage des Schiffes im Inertialsystem.

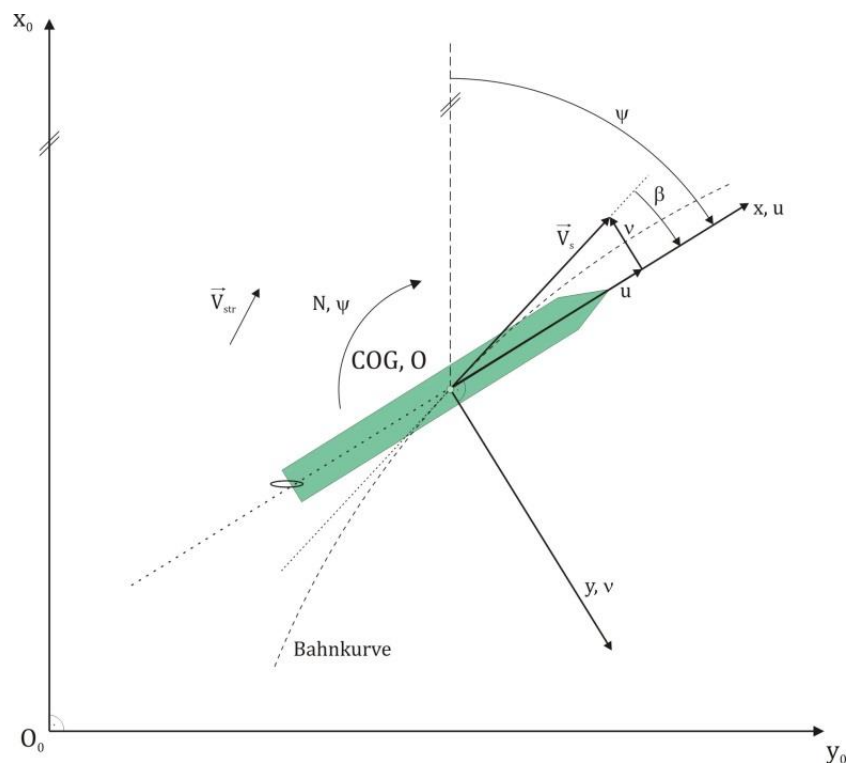


Abbildung 2-2: Definition der Koordinatensysteme (ebene Darstellung) (verändert nach Gronarz, 1997 [37])

Abbildung 2-2 zeigt den Drift- und Kurswinkel sowie die Definition der Koordinatensysteme in der ebenen Darstellung. Der Driftwinkel  $\beta$  bezeichnet den Winkel zwischen der Schiffslängsachse und der Tangente an die Bahnkurve. Er schließt die Achse des Fahrwassers und die Schiffslängsachse ein. Der

Kurswinkel  $\psi$  beschreibt den Winkel gegen Nord und somit den Winkel für die Drehung des erdfesten zum schiffsfesten Koordinatensystem. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gewässers ist mit  $\vec{V}_{str}$  gekennzeichnet. Der Massenschwerpunkt ist als *COG* definiert und  $O$  bzw.  $O_0$  bezeichnen den Ursprung des jeweiligen schiffsfesten bzw. erdfesten Koordinatensystems.

Der Driftwinkel  $\beta$  ist u. a. abhängig von (verändert nach *Adolphi, 1998 [2]*):

- Schiffsabmessungen und Beladung
- Schiffsgeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeit über Grund
- Fließgeschwindigkeit des Wassers
- Manövrierorgane bzw. -eigenschaften des Schiffes (z. B. Bugstrahlruder etc.)
- Hydrodynamische Eigenschaften des Schiffes
- Erfahrung und Geschick des Schiffsführers
- Fahrwasserbedingungen (z. B. Bathymetrie, Buhnen, Abstand zum Ufer etc.)
- Querströmungseinflüsse (z. B. Zuflüsse, Ein- und Ausleitungen etc.)
- Windeinflüsse
- Verkehrssituation (z. B. Begegnungs- und Überholungsvorgänge)

### 2.1.1.2 Bewegungsgleichungen

Die allgemeinen Bewegungsgleichungen eines Schiffes als Starrkörper werden unter Verwendung der Newton-Euler oder Lagrange Gleichungen hergeleitet (*Fossen, 2012 [33]*). Auf eine Herleitung bzw. vollständige Darstellung der Bewegungsgleichungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechende Fachliteratur (u. a. *Abkowitz, 1964 [1]*) verwiesen. *Abkowitz, 1964 [1]* und *Fossen, 2012 [33]* stellen die Bewegungsgleichungen sowohl in 6 als auch in 3 Freiheitsgraden in ihrer Arbeit ausführlich dar.

Exemplarisch werden hier die Bewegungsgleichungen in horizontaler Ebene (Bewegung voraus und seitlich sowie die Drehbewegung um die Hochachse  $z$ ) im schiffsfesten Koordinatensystem dargestellt, da die anderen Bewegungen für eine Vorhersage des Manövrierverhaltens und des Fahrspurbreitenbedarfs in der Binnenschifffahrt nicht von zentraler Bedeutung sind. Jedoch können die übrigen Bewegungen - je nach Fragestellung und Anwendungsfall (z. B. Rollbewegung) - ergänzend berücksichtigt werden.

Befindet sich der Ursprung des schiffsfesten Koordinatensystems nicht im Massenschwerpunkt *COG*, so lassen sich die ebenen Bewegungsgleichungen (Vernachlässigung der drei Freiheitsgrade durch Tauchen, Rollen und Stampfen) für ein Schiff in einem schiffsfesten Koordinatensystem darstellen zu (*Fossen, 2012 [33]*):

Längskraft  $X$  [N]:

$$X = m[\dot{u} - vr - x_g r^2 - y_g \dot{r}] \quad [2-1]$$

Querkraft  $Y$  [N]:

$$Y = m[\dot{v} + ur + x_g \dot{r} - y_g r^2] \quad [2-2]$$

Giermoment um die z-Achse  $N$  [Nm]:

$$N = I_z \dot{r} + m[x_g(\dot{v} + ur) - y_g(\dot{u} - vr)] \quad [2-3]$$

$m$  Schiffsmasse [kg]

$x_g, y_g$  Koordinaten des Massenschwerpunktes  $COG$  [m] im schiffsfesten Koordinatensystem

$u, v$  Geschwindigkeitskomponenten des Schiffes in Längs- bzw. Querrichtung [m/s]

$r$  Gierwinkelgeschwindigkeit um die Hochachse  $z$  [rad/s]

$I_z$  Massenträgheitsmoment um die z-Achse [kgm<sup>2</sup>]

Unter der Annahme, dass die Hauptachsen des Schiffskörpers durch den Massenschwerpunkt  $COG$  verlaufen und sich der Ursprung  $O$  des schiffsfesten Koordinatensystems im Massenschwerpunkt befindet, lassen sich die ebenen Bewegungsgleichungen [2-1] ff. für ein Schiff weiter vereinfachen, indem die Terme mit  $x_g$  und  $y_g$  zu Null werden. Die ebenen Bewegungsgleichungen bilden die Grundlage für die Entwicklung zahlreicher fahrdynamischer Verfahren.

### 2.1.1.3 Ermittlung der äußeren Kräfte und Momente

Die ebenen Bewegungsgleichungen [2-1] ff. können nur bei Kenntnis der hydrodynamischen Kräfte  $X$  und  $Y$  sowie des Momentes  $N$  gelöst werden. Die äußeren Kräfte und Momente sind unbekannt. Durch dreidimensionale Strömungssimulationen auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen können die Kräfte und Momente unter großem Modellierungs- und Lösungsaufwand bestimmt, und die Bewegungsgleichungen somit durch Zeitintegration gelöst werden. Für viele Fragestellungen würde dies zudem hohe Kosten verursachen. In der Praxis wird die Lösung der allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen in sehr wenigen Fällen und kleinen Lösungsgebieten angewandt und ist gerade zur echtzeitfähigen Bestimmung der Kräfte und Momente nicht realistisch. Die Mehrheit der Anwendungen für Schiffsumströmung basiert auf der Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS).

Für einen Binnenschiffsführungssimulator z. B. ist die Lösung der allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen ungeeignet, da sie die Anforderung Echtzeitbetrieb - derzeit - nicht erfüllt. Deshalb wird im Simulator ein vereinfachtes und für den Echtzeitbetrieb geeignetes Verfahren verwendet. Hierbei sind für eine Vorhersage von Schiffsbewegungen ein geeignetes mathematisches Modell und die Kenntnis der hydrodynamischen Koeffizienten in diesem Modell erforderlich. Mit der Kenntnis der Koeffizienten können die unbekannten Kräfte und Momente erfasst werden (Norrbin, 1971 [64]).

Für die Formulierung der äußeren Kräfte auf ein Schiff kann eine Taylorreihenentwicklung angewendet werden, d. h., dass die Einflussgrößen (Geschwindigkeitskomponenten des Schiffes, Winkelgeschwindigkeit, deren Ableitungen, Ruder, Drehzahl etc.) berücksichtigt werden und die Identifikation der sich ergebenden Koeffizienten in Bezug auf die Kraftwirkung auf das ganze Schiff erfolgt (in diesem Fall gültig für das schiffsfeste Koordinatensystem) (Abkowitz, 1964 [1]).

Fossen, 2012 [33] stellt die äußeren Kräfte und Momente durch eine Taylorreihenentwicklung mit hydrodynamischen Koeffizienten exemplarisch für die Längskraft  $X$  und das Giermoment  $N$  wie folgt dar:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u u + X_{uuu}u^3 + X_{\dot{v}}\dot{v} + X_v v + X_{vvv}v^3 + \dots \\ &\quad \vdots \\ N_1 &= N_{\dot{u}}\dot{u} + N_u u + N_{uuu}u^3 + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_v v + N_{vvv}v^3 + \dots \end{aligned} \quad [2-4]$$

Durch die Taylorreihenentwicklung werden die Kräfte und Momente in eine mathematische Form mit Koeffizienten und in Abhängigkeit zu u. a. Geschwindigkeitskomponenten  $u$ ,  $v$  des Schiffes, Winkelgeschwindigkeit  $r$  und den Ableitungen  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$  und  $\dot{r}$  gebracht. Durch getroffene Annahmen (z. B. Symmetrieebenen des Schiffes oder Vernachlässigung der Polynome höherer Ordnung) können Reduzierungen einzelner Terme in der Reihenentwicklung getroffen werden (Abkowitz, 1964 [1]).

In der Schiffsführungssimulation wird häufig ein koeffizientenbasiertes, mathematisches Modell in der modularen Formulierungsweise mit einer Aufteilung in Systemelemente eingesetzt. D. h., dass die äußeren Kräfte zunächst ursächlich aufgeteilt (Rumpf-, Ruderkräfte etc.) und jeweils getrennt modelliert werden (Oltmann, Sharma, 1984 [68]). Je nach Fragestellung und Anwendungsfall müssen gegebenenfalls weitere Kräfte bzw. Momente infolge Wind, Querstrahler, Trosse, Flachwasser, Banking etc. berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten kann durch Systemidentifikation auf Basis von Messungen oder Berechnungen erfolgen. Die Koeffizienten werden z. B. aus frei fahrenden Manövern in Großausführungsmessungen oder Modellversuchen ermittelt, z. B. bei gefesselten Modellversuchen (Wolff, 1981 [81]; Gronarz, 1997 [37]).

### 2.1.2 Schiffsbewegungen aus Trassierungsverfahren

Unter einem Bemessungsschiff versteht man den für die Planung maßgebenden Schiffstyp und dessen Hauptabmessungen. Wesentliche Einflussfaktoren für eine Trassierung einer Fahrrinne sind der zugelassene Schiffstyp inkl. Manövriereigenschaften, der Abladetiefe, der Gewässerverlauf, die Strömungssituation, die Verkehrssituation und weitere Störeinflüsse (z. B. Wind).

Alternativ zu den allgemeinen Bewegungsgleichungen (Kapitel 2.1.1) existieren Trassierungsverfahren, welche die Schiffsbewegung zur Ermittlung der Fahrspurbreiten beschreiben. Die Ansätze sind gültig bei klar definierten Randbedingungen. Bemessungsszenarien, bei denen besondere Faktoren wie z. B. starke Querströmungen, wechselnde Querschnittsabmessungen, starker Wind, schlechte Sicht, Manövriereigenschaften etc. relevant sind, müssen gesondert durch zusätzliche Sicherheitszuschläge berücksichtigt oder z. B. mittels des Einsatzes eines Binnenschiffsführungssimulators abgeschätzt werden. In Abhängigkeit der Zielsetzung und vorliegenden Randbedingungen werden unterschiedliche fahrdynamische Verfahren zur Fahrspurbreitenermittlung angewendet.

Um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu gewährleisten, muss die Fahrspurbreite einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den Fahrrinnenrändern, den vor Anker liegenden Schiffen und den Bauwerken bzw. den Ufern sicherstellen. Bei Begegnungs- bzw. Überholvorgängen von Schiffen müssen ergänzend ebenfalls geeignete Sicherheitsabstände berücksichtigt werden.

### 2.1.2.1 Fahrspurbreite bei der Geradeausfahrt

Kehrt ein Schiff bei festgehaltenem Ruder nach einer Störung auf gerader Bahn wieder auf eine gerade Bahn zurück, bezeichnet man das Schiff als dynamisch kursstabil. Bei kursinstabilen Schiffen sind in der Realität auch bei kleinen Störungen (z. B. asymmetrische Umströmung im Heckbereich von Einschraubern) fortlaufend Rudereinsätze notwendig, um geradeaus zu fahren. Aufgrund von veränderlichen Umgebungsbedingungen (z. B. Strömung, Wind) bzw. der Auswirkung von kleinen Störungen sind selbst bei kursstabilen Schiffen in der Geradeausfahrt Änderungen des Ruderwinkels erforderlich. Die Fahrspurbreite  $b$  bei der Geradeausfahrt ergibt sich somit in der Praxis aus der Schiffsbreite  $B$  und einer Zusatzbreite  $\Delta B_F$ :

$$b = B + \Delta B_F \quad [2-5]$$

$b$       Fahrspurbreite [m]

$B$       Schiffsbreite [m]

$\Delta B_F$     Zusatzbreite [m]

In den *Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen des BMVBS, 2011 [11]* sind für die Geradeausfahrt Fahrspurbreiten der Regelschiffe (Länge bis zu 185 m und Breite von 11,45 m) von 15,5 m bzw. 16 m im Begegnungsverkehr und 18,4 m im Richtungsverkehr angegeben.

International findet man für die Bemessung von Binnenwasserstraßen die Richtlinien nach *PIANC-IAPH (Permanent International Association of Navigation Congresses), 1995 [69] und 1997 [70]*. Hier wird die Fahrspurbreite eines Schiffes in Kanälen abhängig von den Manövriereigenschaften (gut, moderat, schwach) angegeben als die 1,3 bzw. 1,5 oder gar die 1,8 fache Breite des Schiffes. Es handelt sich hierbei um empirisch ermittelte Faktoren.

Im Richtungsverkehr wird in den Richtlinien die Fahrrinnenbreite angegeben als Summe aus Manövrierbreite, linker und rechter Abstand zum Ufer und Zusatzbreiten (z. B. Wind). Im Begegnungsverkehr wird bei der Berechnung der Fahrrinnenbreite die doppelte Manövrier- und Zusatzbreite angesetzt und die Uferabstände sowie ein Abstand zwischen den Schiffen aufsummiert.

Fahrten in allseitig unbegrenztem Fahrwasser lassen eine vergleichsweise ruhigere bzw. störungsfreie Fahrt zu, als in Flachwasser bzw. im ufernahen Bereich, da keine Wechselwirkung zwischen Schiff und Fahrwasserbegrenzung (Bankeffekte) auftritt. Des Weiteren hängt die Fahrspurbreite neben der Interaktion Schiff / Schiff bzw. Schiff / Ufer von der Aufmerksamkeit des Schiffsführers und damit dessen Steuerfähigkeit sowie Störeinflüsse (z. B. Sicht, Wind, Verkehrssituation) ab.



Im Jahr 2010 wurde die PIANC-Arbeitsgruppe INCOM WG 141 gegründet, um geeignete Richtlinien und Bemessungsstandards für die Binnenwasserstraßen zu entwickeln. Ein Entwurf der zukünftigen Richtlinien ist in Arbeit (Söhngen, Eloit, 2014 [76]).

### 2.1.2.2 Fahrspurbreite bei der Kurvenfahrt in Stillgewässern

Die Fahrspurbreiten bei der Kurvenfahrt in Still- und besonders auch in Fließgewässern ergeben durch die stetigen Kursanpassungen einen variierenden Verlauf in der Breite (siehe exemplarisch Abbildung 2-3).

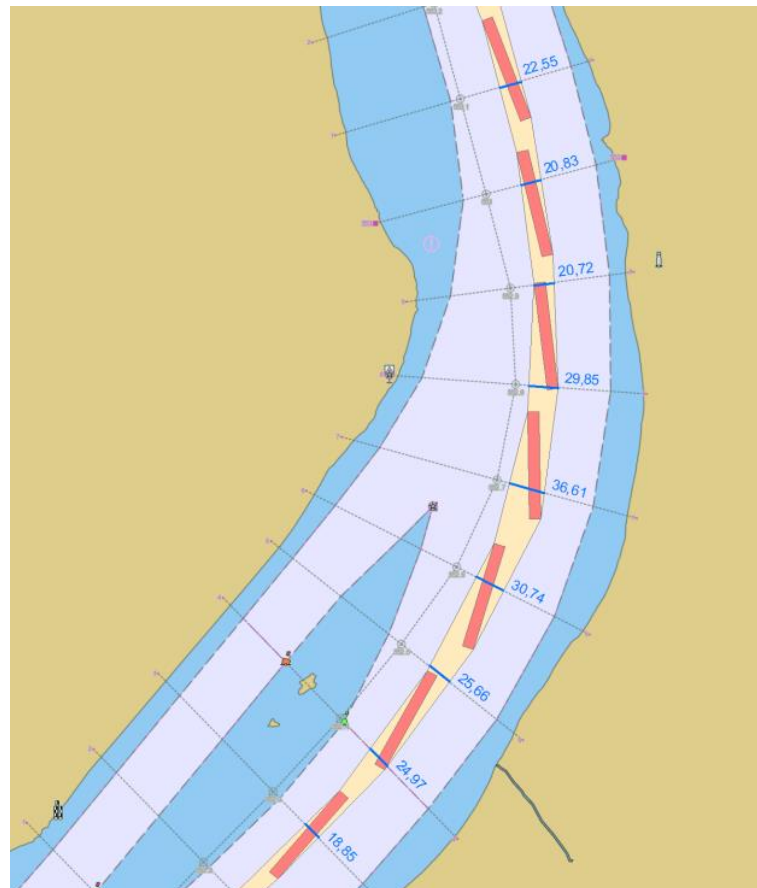


Abbildung 2-3: Darstellung der benötigten Fahrspurbreite (blau), der Schleppfläche (gelb) und der Schiffsphasen (rot) in einer Kurvenfahrt am Beispiel einer Großausführungsmessung

Bei einer Fahrt in einem nicht fließenden Gewässer hängt der Fahrspurbreitenbedarf für ein Schiff von den Schiffsabmessungen und den zu fahrenden Kurvenradien und damit von dem zugehörigen Driftwinkel  $\beta$  bzw. der Position des taktischen Drehpunktes  $TDP$  (Punkt auf der Schiffsmittellinie, um den sich ein Schiff bei einer Kurvenfahrt dreht) ab (siehe Abbildung 2-2 bzw. Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6).

In Großausführungsmessungen kann der Driftwinkel eines Schiffes durch den Positionsbezug in den Radarbildern oder mittels Messeinrichtungen auf dem Schiff ermittelt werden. Hierfür muss ein Kompass mit GPS-Empfängern oder z. B. zwei getrennte GPS-Empfänger am Bug und am Heck auf

dem Schiff installiert sein. Daraus kann die Position und der Winkel gegen Nord zeitbezogen abgeleitet und die Bewegungsphasen des Schiffes reproduziert werden. Des Weiteren lassen sich daraus neben dem Driftwinkel, die Bahnkurve, die Fahrspurbreiten und die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund ermitteln.

Der Driftwinkel kann in Abhängigkeit des Kurvenradius dargestellt werden (siehe Abbildung 2-4). Die Driftwinkel stammen aus Großausführungsversuchen in Stillgewässern mit einem Schubverband von 185 m Länge. Der Driftwinkel ist während der Kurvenfahrt in Gewässern nicht konstant, sondern variiert. Bei größer werdenden Kurvenradien nimmt der Driftwinkel ab.

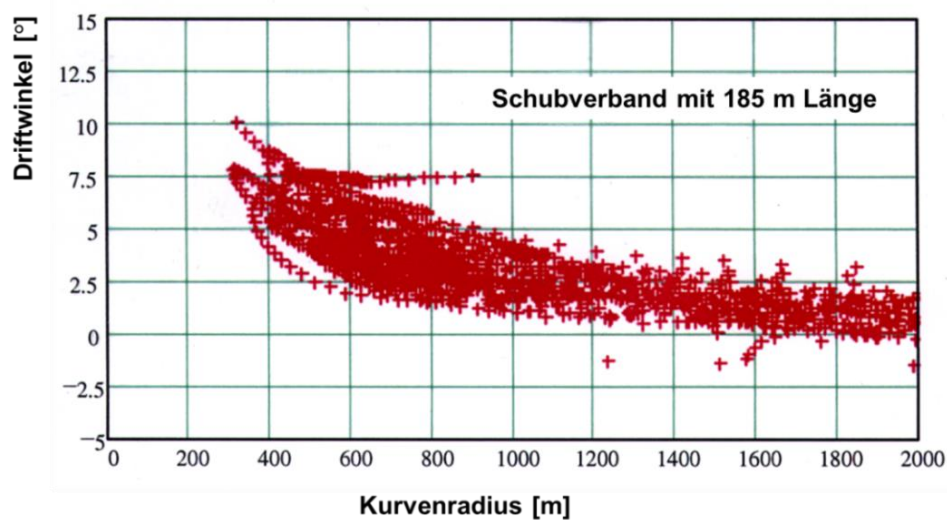


Abbildung 2-4: Aus Großausführungsmessungen in Stillgewässern abgeleitete Driftwinkel in Abhängigkeit des Kurvenradius für einen Schubverband mit 185 m Länge (BAW, 2014 [7])

Nach dem Ansatz von *Graewe, 1971 [36]* kann die Fahrspurbreite in Abhängigkeit des Kurvenradius (für  $R < 2000 \text{ m}$ ), des gemessenen Driftwinkels (für  $\tan \beta \leq L / \left[ 2 \left( R + \frac{B}{2} \right) \right]$ ) und der Schiffsgeometrie basierend auf einer geometrischen Betrachtung der Abfolge von Schiffsphasen berechnet werden:

$$b = \sqrt{(R + B)^2 + \left[ \frac{L}{2} + \left( R + \frac{B}{2} \right) \cdot \tan \beta \right]^2} - R \quad [2-6]$$

- $b$  Fahrspurbreite [m]
- $R$  Kurvenradius [m]
- $B$  Schiffsbreite [m]
- $L$  Schiffslänge [m]
- $\beta$  Driftwinkel [°] z. B. aus Großausführungsmessungen

Die Bewegung des taktischen Drehpunktes *TDP* auf der Schiffsmittellinie in der Kurvenfahrt wirkt sich auf die Fahrspurbreite des Schiffes aus. Die Position des taktischen Drehpunktes wird durch den

zuvor gemessenen Driftwinkel  $\beta$  bestimmt. Alternativ kann er durch die dimensionslose Größe  $C_f$  erfasst werden. Der  $C_f$ -Wert multipliziert mit der Schiffslänge  $L$ , gibt den Abstand des taktischen Drehpunktes vom Heck in Längsrichtung des Schiffes vor. Ab einem Radius von  $R > 2000m$  wird die Fahrwasserstrecke allgemein als Gerade angesehen.

Abbildung 2-5 zeigt die geometrische Bestimmung der Fahrspurbreite, wenn der taktische Drehpunkt  $TDP$  zwischen Schiffsmittle und Bug liegt. Für diese Betrachtung wird auf der sicheren Seite liegend für das Schiff eine rechteckförmige Grundfläche von  $L \cdot B$  angenommen.  $MS$  kennzeichnet die Mitte des Schiffes und  $r$  den Radius der Bahnkurve.

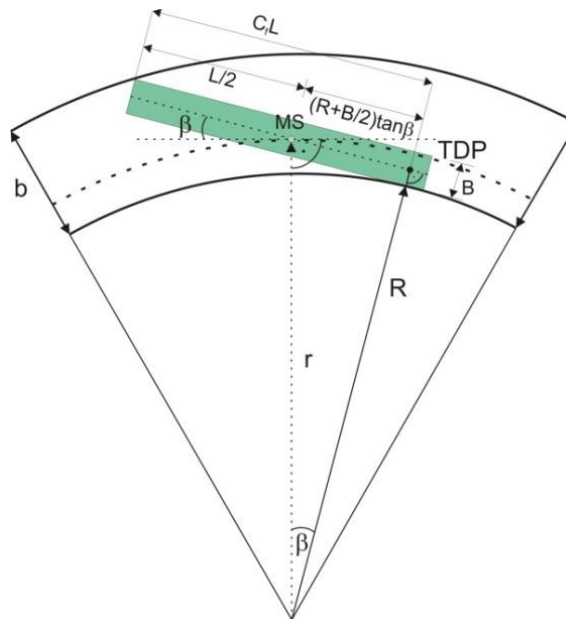


Abbildung 2-5: Fahrspurbreite eines Schiffes bei der Kurvenfahrt (verändert nach BAW, 2004 [3]) (Taktischer Drehpunkt zwischen Schiffsmittle und Bug)

Die Position des taktischen Drehpunktes kann trigonometrisch aus dem Driftwinkel wie folgt abgeleitet werden:

$$C_f = \frac{\frac{L}{2} + \left(R + \frac{B}{2}\right) \cdot \tan \beta}{L} \quad \text{oder} \quad C_f = \frac{\frac{L}{2} + r \cdot \sin \beta}{L} \quad [2-7]$$

Aus Gleichung [2-6] ergibt sich die Fahrspurbreite in Abhängigkeit des taktischen Drehpunktes mit Gleichung [2-7] für  $\frac{L}{2} < C_f \cdot L < L$  zu:

$$b = \sqrt{(R + B)^2 + (C_f \cdot L)^2} - R \quad [2-8]$$

Abbildung 2-6 zeigt die geometrische Bestimmung der Fahrspurbreite, wenn der taktische Drehpunkt vor dem Bug des Schiffes ( $C_f > 1$ ) liegt.

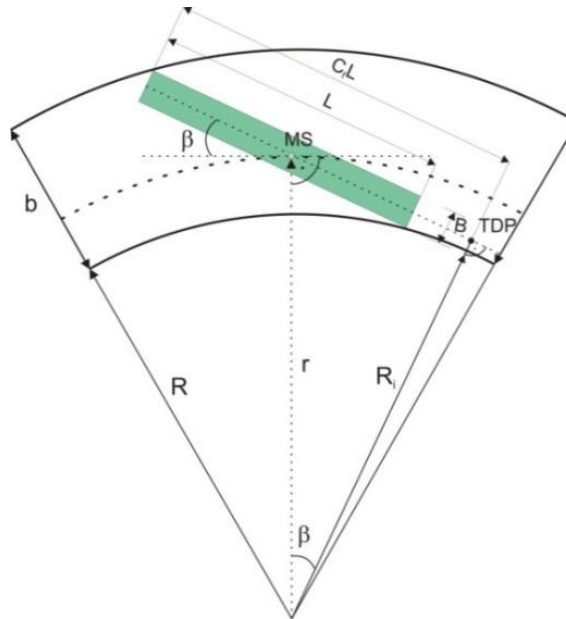


Abbildung 2-6: Fahrspurbreite eines Schiffes bei der Kurvenfahrt (Taktischer Drehpunkt vor dem Schiff)

Die Fahrspurbreite in Abhängigkeit des taktischen Drehpunktes ergibt sich mit Angabe des inneren Kurvenradius  $R_i$  für  $C_f \cdot L > L$  zu:

$$b = \sqrt{(R_i + B)^2 + (C_f \cdot L)^2} - R \quad [2-9]$$

mit  $R = \sqrt{R_i^2 + \left[ \left( R_i + \frac{B}{2} \right) \tan \beta - \frac{L}{2} \right]^2}$

und  $L \cdot (C_f - 1) = \left( R_i + \frac{B}{2} \right) \cdot \tan \beta - \frac{L}{2}$

folgt  $R = \sqrt{R_i^2 + [L \cdot (C_f - 1)]^2}$

und somit berechnet sich die Fahrspurbreite  $b$  aus Gleichung [2-9] für  $C_f \cdot L > L$  als:

$$b = \sqrt{(R_i + B)^2 + (C_f \cdot L)^2} - \sqrt{R_i^2 + [L \cdot (C_f - 1)]^2} \quad [2-10]$$

$b$	Fahrspurbreite [m]
$R_i$	Innerer Kurvenradius [m]
$R$	Kurvenradius [m]
$B$	Schiffsbreite [m]
$L$	Schiffslänge [m]

$\beta$  Driftwinkel [°] z. B. aus Großausführungsmessungen  
 $C_f$  Koeffizient [-]

Führt man Driftwinkel aus Großausführungsmessungen in Stillgewässern (siehe Abbildung 2-4) in den dimensionslosen Koeffizienten  $C_f$  über, so erhält man für  $C_f$  einen über den Kurvenradius nahezu konstanten Beiwert (siehe Abbildung 2-7). Die Position des taktischen Drehpunktes ist somit unabhängig vom Kurvenradius und von der Schiffsgeschwindigkeit, da in einem Kanal die Anströmgeschwindigkeit auf das Schiff gleich der Geschwindigkeit über Grund ist. Die Position ändert sich aber u. a. in Abhängigkeit des Schiffstyps bzw. des Beladungszustandes.

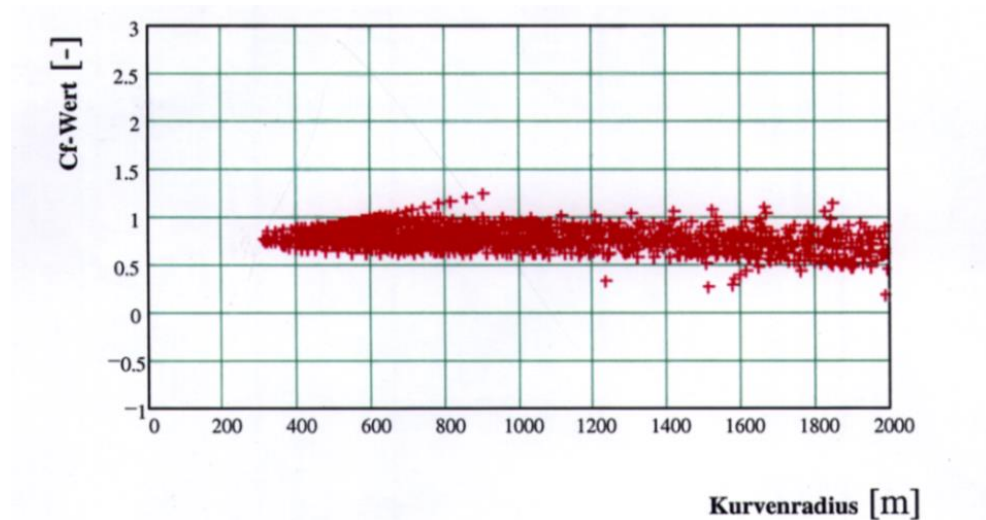


Abbildung 2-7: Aus Driftwinkel abgeleitete  $C_f$ -Werte in Abhängigkeit des Kurvenradius für einen Schubverband mit 185 m Länge ( $C_f$ -Wert etwa 0,9) (BAW, 2014 [7])

Dettmann, 1998 [25] leitete auf der Grundlage von Naturuntersuchungen mit Binnenschiffen Empfehlungen zum  $C_f$ -Wert für die Bemessung von Fahrrinnen verschiedener Wasserstraßenklassen in Kanal- bzw. Flusskrümmungen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten ab (siehe Abbildung 2-8). Die Empfehlungen für die  $C_f$ -Werte liegen zwischen 0,9 und 1,0 je nach Wasserstraßenklasse und Beladungszustand des Schiffes. Leerfahrten bzw. flach abgeladene Schiffe haben einen größeren Fahrspurbreitenanspruch als tief abgeladene Schiffe.

In den Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen (BMVBS, 2013 [11]) wurde für die Linien- und Kurvenführung bei der Trassierung u. a. angegeben, dass aus fahrdynamischen Gründen auf einen stetigen Verlauf der Bahnkurven geachtet werden soll. Die Grundelemente für den Verlauf der Bahnkurve sind Geraden und Kreisbögen und jeder Trassierungsabschnitt soll eine Mindestlänge aus Gründen der Sicherheit und Leichtigkeit nicht unterschreiten.









	Bemessungsschiffe		Formation	fahrdyn. Konstante	
				beladen	leer
III	Gustav Koenigs	L = 67 - 80 m		0,9	1,0
IV	Johann Welker (Europaschiff)	L = 80 - 85 m		0,9	1,0
	Schubverband einspurig - eingliedrig	L = 85 m		—	—
Va	Großes Rheinschiff Großmotorgüterschiff	L = 95 - 110 m L = 110 m 2)		1,0	1,0
	Schubverband einspurig - eingliedrig	L = 95 - 110 m		—	—
Vb	Schiebendes Motorschiff	L = 172 - 185 m		0,9	1,0
	Schubverband einspurig - zweigliedrig	L = 172 - 185 m		—	—
	Schubverband	L = 185 m 2)		—	—

Abbildung 2-8: Empfehlungen zum  $C_f$ -Wert (abgeleitet aus Naturuntersuchungen) für verschiedene Wasserstraßenklassen zur Berechnung der Fahrspur- bzw. Fahrrinnenbreite (BMVBS, 2011 [11]; Dettmann, 1998 [25])

Graewe, 1971 [36] stellte basierend auf seinen Untersuchungen folgende Empfehlungen für die Bemessung von Fahrwasserbreiten in Krümmungen für Kanäle und Flüsse auf:

$$B_{w1} = 2 \cdot B_1 + 8m \quad (\text{Kanal}) \quad [2-11]$$

$$B_{w2} = B_1 + B_2 + 16m \quad (\text{Fluss}) \quad [2-12]$$

$B_1$  Fahrspurbreite [m] eines Schubverbandes (in Bergfahrt volle Abladung)

$B_2$  Fahrspurbreite [m] eines Schubverbandes (in Talfahrt leer)

$B_{w1}$  Fahrwasserbreite [m] in Kanälen

$B_{w2}$  Fahrwasserbreite [m] in Flüssen

Weitestgehend kleine Radien sollten in der Trassierung vermieden werden. Graewe empfiehlt das Verfahren in Kanälen mit Radien  $R \leq 400 \text{ m}$  und Zentriwinkeln  $\alpha \leq 30^\circ$  sowie in Flüssen mit Radien  $R \leq 500 \text{ m}$  und Zentriwinkeln  $\alpha \leq 10^\circ$  nicht anzuwenden (Graewe, 1971 [36]).

### 2.1.2.3 Fahrspurbreite bei der Kurvenfahrt in Fließgewässern

Bewegt sich ein Schiff in einem fließenden Gewässer, so unterscheidet sich die Geschwindigkeit über Grund (Reisegeschwindigkeit) von der Geschwindigkeit gegen Wasser (Schiffs- bzw. Fahrgeschwindigkeit). Diese wird für Bergfahrer (Minuszeichen) und Talfahrer (Pluszeichen) ermittelt:

$$V_{\text{üG}} = V_S \pm V_{\text{Str}} \quad [2-13]$$

$V_{\text{üG}}$  Geschwindigkeit über Grund [m/s]

$V_S$  Geschwindigkeit gegen Wasser bzw. Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

$V_{\text{Str}}$  Fließgeschwindigkeit [m/s]

Die Lage des taktischen Drehpunktes eines Schiffes wird in Fließgewässern durch die Strömungsgeschwindigkeiten zusätzlich beeinflusst. Aufgrund verschiedener Geschwindigkeiten des Schiffes gegen Wasser bei gleicher Geschwindigkeit über Grund  $V_{üG}$  und resultierender Änderungen in der Anströmungsgeschwindigkeit des Schiffes verschiebt sich der taktische Drehpunkt in der Tal- gegenüber der Bergfahrt weiter bugwärts. Die Fahrspurbreite muss deshalb je nachdem, ob sich das Schiff in der Berg- oder Talfahrt befindet, getrennt ermittelt werden (siehe Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10). Im Vergleich zur Talfahrt verringert sich die Fahrspurbreite in der Bergfahrt infolge eines kleineren Driftwinkels.

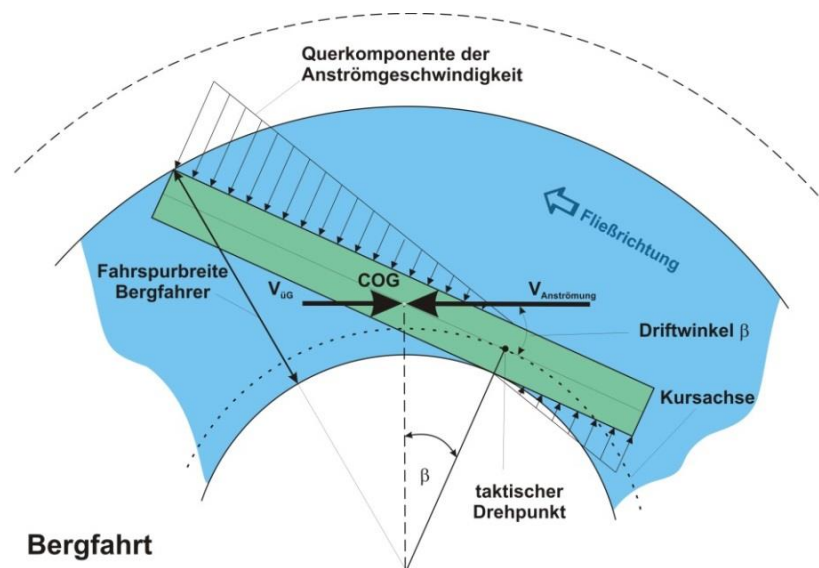


Abbildung 2-9: Fahrspurbreitenbedarf eines Binnenschiffes in einem fließenden Gewässer zu Berg (verändert nach Heinzelmann et al., 2009 [46])

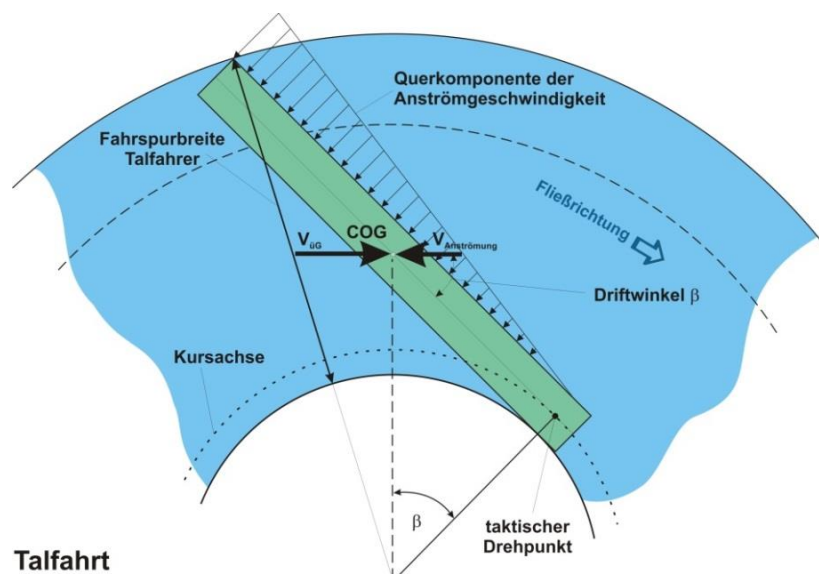


Abbildung 2-10: Fahrspurbreitenbedarf eines Binnenschiffes in einem fließenden Gewässer zu Tal (verändert nach Heinzelmann et al., 2009 [46])



Naturuntersuchungen in Fließgewässern belegen, dass ähnlich wie in Stillgewässern (Kapitel 2.1.2.2), die Position des taktischen Drehpunktes unabhängig vom Kurvenradius, jedoch abhängig von dem Schiffstyp bzw. Beladungszustand, der Fließgeschwindigkeit des Wassers, der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes und somit auch der Fahrtrichtung ist.

Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch für Gütermotorschiffe (GMS) die Abhängigkeit des  $C_f$ -Wertes von der Fließgeschwindigkeit des Wassers  $V_{Str}$  und der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser  $V_w$  (bzw. Schiffsgeschwindigkeit  $V_S$ ) für die Berg- und Talfahrt abgeleitet aus Messkampagnen. Bei der Bergfahrt liegt der taktische Drehpunkt stets innerhalb des Schiffes ( $C_f$ -Wert kleiner 1). Bei der Talfahrt befindet sich der taktische Drehpunkt meist vor dem Schiff.

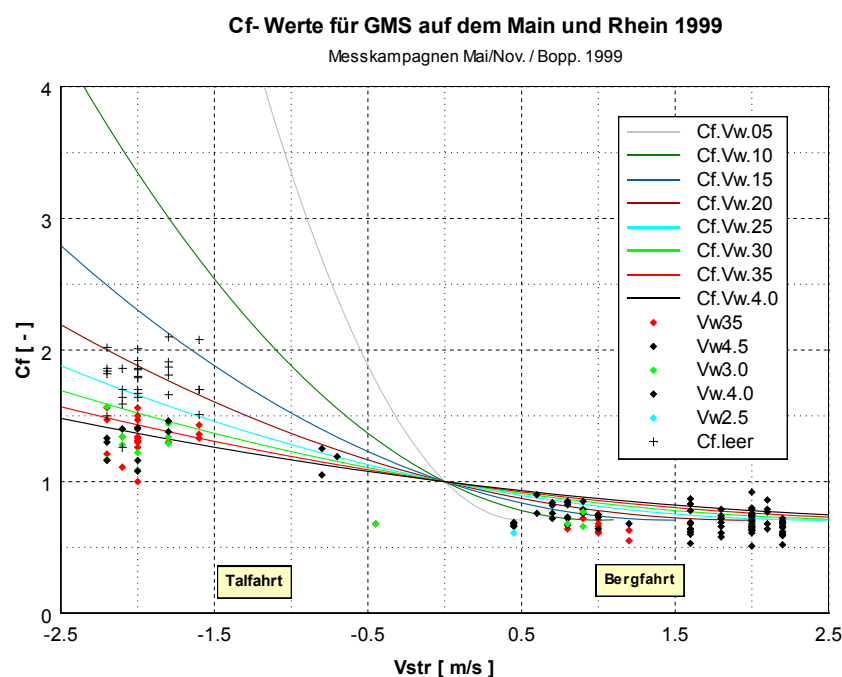


Abbildung 2-11:  $C_f$ -Werte für Gütermotorschiff (GMS) abgeleitet aus Messkampagnen (BAW, 2014 [8])

Aus der Abbildung 2-11 können die  $C_f$ -Werte exemplarisch für Gütermotorschiffe abgelesen werden und mit Kenntnis des Kurvenradius die Fahrspurbreiten nach den Gleichungen [2-8] und [2-10] in Kapitel 2.1.2.2 ermittelt werden.

## 2.2 Grundlagen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung

Nach der Einführung in die Begrifflichkeiten und Grundlagen der Fahrdynamik (Kapitel 2.1), befasst sich dieses Kapitel mit der Ermittlung der Strömungskenngrößen in offenen Gerinnen mit freier Oberfläche. Freifließende Gewässer weisen aufgrund der natürlich vorkommenden Abflussschwankungen wechselnde Wasserspiegellagen und somit auch veränderliche Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten auf. Zur Bestimmung der Strömungskenngrößen in offenen Gerinnen werden je nach Anforderungen, Möglichkeiten und Zielsetzung unterschiedliche Methoden bzw. Modelle eingesetzt. Die Methoden reichen von vereinfachten Ansätzen der Gerinnehydraulik, über Natur-



messungen oder gegenständliche Modellierung im Labor, bis hin zur ein- bzw. mehrdimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung. Für verkehrswasserbauliche Untersuchungen (z. B. für den Ausbau und die Unterhaltung einer Wasserstraße) werden zunehmend hydrodynamisch-numerische Modelle zur Simulation von Strömungen eingesetzt.

Die hochaufgelösten Strömungsinformationen (u. a. Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) bei unterschiedlichen Abflüssen und Randbedingungen in einem Untersuchungsgebiet bilden eine wesentliche Grundlage für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Einsatz zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Strömungsmodelle das geeignete Mittel zur Wahl, möglichst zeitnah und flächendeckend hochaufgelöste Strömungsinformationen in einem Untersuchungsgebiet bei unterschiedlichen Abflüssen und Randbedingungen zu bestimmen. Hierbei werden die Gewässergeometrie oder ggf. geometrische Variantenstudien berücksichtigt. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung von der Modellbildung, der Anwendung, den Grundgleichungen bis hin zur Modellgüte und Fehlerquellen vorgestellt. Für eine ausführliche Herleitung und Darstellung der Grundgleichungen wird auf Anhang 2 oder einschlägige Fachliteratur verwiesen.

### 2.2.1 Modellbildung

Unter einem Modell versteht man ein vereinfachendes Abbild eines realen Systems. Es bezieht sich auf einen räumlichen Ausschnitt aus der Natur, in dem - angepasst für den jeweiligen Anwendungsfall - die wesentlichen Prozesse und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Für die Modellierung von Strömungsprozessen wurden früher vermehrt physikalische Maßstabsmodelle im Labor eingesetzt. Ergänzend sei erwähnt, dass Strömungskenngrößen auch durch Naturmessungen bestimmt werden können. Jedes Verfahren hat jedoch seine Vor- / Nachteile hinsichtlich Aufwand, Kosten, Genauigkeit und Auflösung bzw. umfassender Bereitstellung der Strömungskenngrößen über das gesamte Abflussspektrum. Im Zeitalter der leistungsstarken Computertechnik können die Strömungsprozesse mathematisch mittels hydrodynamisch-numerischen Modellen (HN-Modell) simuliert werden. Die numerische Modellierung ist aber nicht als Ersatz für die physikalische Modellierung zu sehen, sondern als Ergänzung bzw. gegenseitige Stärkung. Auf die Grundlagen der physikalischen Modellierung wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, aber einen guten Einblick in das wasserbauliche Versuchswesen, die Ähnlichkeitsmechanik und die Modellgesetze gibt die *DVWK-Schrift 39* von Kobus et al., 1984 [54].

Die numerische Strömungssimulation ermöglicht es, zahlreiche geometrische Variantenstudien zu untersuchen und zu vergleichen, welche experimentell gar nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand an Zeit und Kosten gewonnen werden können. Das Strömungsmodell ist - bei einer korrekten Anwendung - ein wertvolles und vertrauenswürdiges Werkzeug zur Berechnung hydraulischer Kenngrößen (z. B. Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten).

Für konkrete Anwendungsfälle und Fragestellungen liefern die numerischen Modelle orts- und zeitabhängige Informationen über die im Untersuchungsgebiet vorhandene oder zu erwartende Strömungssituation. Zur Beurteilung der Genauigkeit und Einsatzfähigkeit des Modells wird dieses

vor dem eigentlichen Betrieb kalibriert, d. h. die Berechnungsergebnisse sollen nach der Kalibrierung möglichst gut mit aufgezeichneten Messdaten übereinstimmen. Dies wird durch Anpassung geeigneter Kalibrierungsparameter (Rauheit des Modells) erreicht. Für die Kalibrierung der Strömungsmodelle werden zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen aufgezeichnete Messdaten, z. B. Wasserspiegellagenfixierungen (vorwiegend Längsschnitte) sowie Strömungsgeschwindigkeiten und daraus abgeleitete Abflussmengen, verwendet. Die Messdaten werden meist mittels einem ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), Messflügeln, Echolot, Pegeln oder Wasserstandsradar bestimmt. Abschließend wird das Modell durch den Vergleich mit unabhängigen, nicht für die Kalibrierung verwendeten Messdaten, validiert. Die Anzahl unabhängiger Messereignisse und die Erhebungsichte der Messdaten haben Einfluss auf die Modellgüte. Durch Sensitivitätsanalysen kann abgeschätzt werden, wie sensitiv und empfindlich das Modell bzw. die Modellergebnisse auf kleine Änderungen bezüglich der Eingangsdaten reagiert. An den Modellgrenzen steht das Modell in Wechselwirkung mit den Ein- und Ausgangsgrößen, den Anfangs- bzw. Randbedingungen.

Abbildung 2-12 zeigt exemplarisch ein Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Modellierung zur Simulation von Strömungen. HN-Modelle müssen die geometrische und physikalische Komplexität des Untersuchungs- bzw. Strömungsgebietes erfassen. Die Modelle basieren auf hydrodynamischen Grundgleichungen zur räumlich dreidimensionalen und zeitabhängigen Beschreibung von Strömungsvorgängen in Gewässern. Diese Grundgleichungen der numerischen Modellierung werden unter Berücksichtigung der Erhaltungssätze für Masse und Impuls aufgestellt.

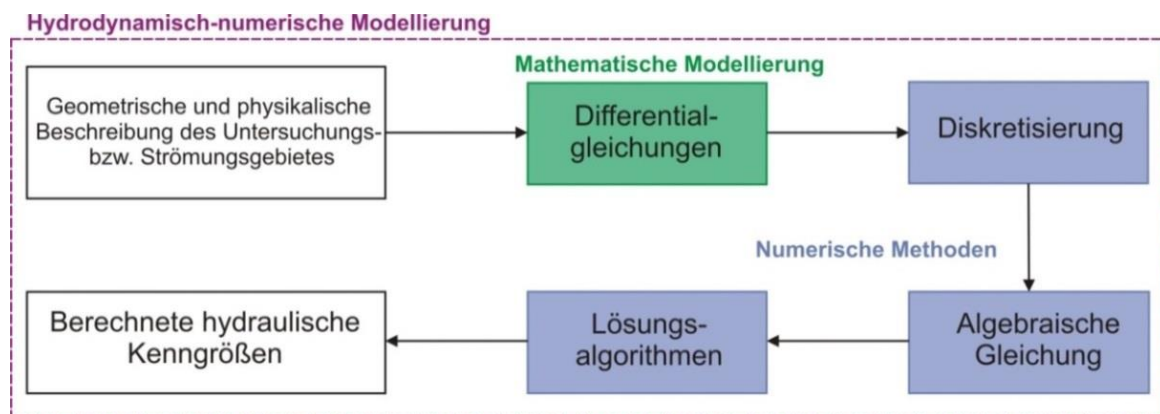


Abbildung 2-12: Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Modellierung (verändert nach Forkel, 2004 [32]; Oberle, 2004 [65])

Die mathematische Modellbildung entspricht der mathematischen Beschreibung der für die Lösung des Problems maßgebenden physikalischen Prozesse durch Differentialgleichungen. Bei den Differentialgleichungen handelt es sich um gekoppelte, nicht lineare, partielle Differentialgleichungen, die im Allgemeinen nur schwer lösbar sind. Eine direkte analytische Lösung der Differentialgleichungen ist äußerst komplex und nur für wenige idealisierte Fälle und Fragestellungen überhaupt möglich. Zur praktikablen Lösung der komplexen Gleichungen werden numerische Verfahren eingesetzt, die sogenannte Näherungslösungen für die gesuchten Unbekannten auf

bestimmten Raum- und Zeitpunkten ermitteln. Die Differenzenquotienten (Ableitungen in die Raumrichtungen  $\partial u_i / \partial x_j$  bzw. nach der Zeit  $\partial u_i / \partial t$ ) der Differentialgleichungen werden diskretisiert, indem das Modellgebiet in einzelne Punkte, Flächen- oder Volumenelemente zerlegt und der Untersuchungszeitraum in eine endliche Anzahl von Zeitschritten aufgeteilt wird. Die Differentialgleichungen werden sozusagen auf dem Lösungsgebiet in Raum und Zeit diskretisiert. Auf diesen Berechnungspunkten werden die Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen überführt und mittels Lösungsalgorithmen die Näherungslösungen für eine endliche Anzahl an Raum- und Zeitpunkten (Stützstellen) bestimmt. Im Ergebnis erhält man die orts- und zeitabhängigen hydraulischen Kenngrößen wie z. B. Fließtiefen, Geschwindigkeiten, Schubspannungen an den jeweiligen Berechnungspunkten.

### 2.2.2 Modellanwendung und Modellanforderungen

Die Modellanwendungen im Bereich der Strömungssimulation lassen sich in drei Kategorien einteilen. In der *DVWK-Schrift 127 (Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.)* können nach Zielke et al., 1999 [87] die Anwendungen der Modelle wie folgt klassifiziert werden:

- Zur Simulation des Strömungsverhaltens bzw. der Strömungscharakteristik unter vorgegebenen Randbedingungen sowie bekannter Systemparameter (Geometrie, Rauheit)
- Zur Prognoserechnung bei unveränderten Systemparametern, aber veränderten Randbedingungen
- Zur Prognoserechnung bei veränderten Systemparametern, mit oder ohne veränderte Randbedingungen

Strömungen können hinsichtlich ihrer Strömungscharakteristik unterschieden werden in eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Strömungen. Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Wahl der entsprechenden Grundgleichungen zur hydrodynamisch-numerischen Modellierung der Strömungskenngrößen.

Eindimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle (1D-HN-Modell) werden in Flussabschnitten mit einer überwiegend eindimensionalen Strömungscharakteristik eingesetzt (siehe Abbildung 2-13, oben). Als Ergebnis erhält man über den Profilquerschnitt ( $x$ ) gemittelte Wasserstände  $h$  sowie lateral und tiefengemittelte Geschwindigkeiten  $u$ . 1D-HN-Modelle werden bevorzugt bei großräumigen (einige 100 Kilometer Länge) und instationären (zeitabhängig,  $t$ ) Untersuchungen eingesetzt, da sie aufgrund des geringen Berechnungsaufwands äußerst effektiv und dadurch sogar operationell eingesetzt werden können (BAW, 2007 [4]).

2D-HN-Modelle werden eingesetzt, wenn keine eindimensionale Strömungscharakteristik vorliegt und detaillierte Kenntnisse über die ebene Verteilung ( $x, y$ ) der Strömungskenngrößen im Modellgebiet erforderlich sind (siehe Abbildung 2-13, mittig). Im Zuge der heutigen leistungsstarken Arbeitsplatzrechner bzw. der Hochleistungsrechencluster werden diese verstärkt zur Strömungsmodellierung für klein- bis großräumige Untersuchungen eingesetzt. Durch Lösen der tiefengemittelten Flachwassergleichungen erhält man an jedem Punkt des Berechnungsgitters u. a. die

Fließtiefe  $h$  und die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeitskomponenten  $u, v$  in  $x$ - und  $y$ -Richtung. 2D-HN-Modelle sind heute Stand der Technik. Die Modelle werden überwiegend zur Strömungssimulation komplexer Fließgewässerabschnitte mit überfluteten Vorlandbereichen, in Mündungsbereichen oder mit Wasserbauwerken eingesetzt. Die steigende Rechnerleistung, vorhandene Hochleistungsrechner und parallelisierter Betrieb numerischer Verfahren, ermöglichen inzwischen - je nach Auflösung des Berechnungsgitters und der Größe des Modellgebietes bzw. der Vorlandanbindung - die Modellierung von Fließgewässerabschnitten von etwa 80 bis 100 km Länge.

3D-HN-Modelle berücksichtigen die räumliche Verteilung der Strömung (Geschwindigkeitskomponenten  $u, v, w$ , Wassertiefe  $h$  und Druck  $p$ ) in allen drei Dimensionen  $x, y, z$  (siehe Abbildung 2-13, unten). Der Rechenaufwand ist deutlich größer als bei 2D-HN-Modellen. Der Anwendungsbereich liegt bei kleinskaligen Untersuchungen von wenigen Flusskilometern bzw. bei Nahfeldberechnungen von z. B. Bauwerksumströmungen.

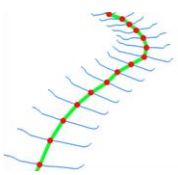
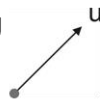
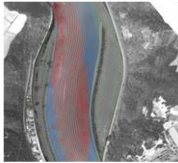
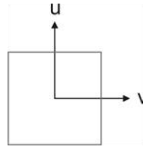
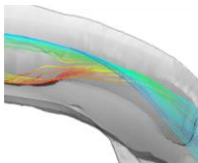
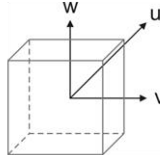
Modellierungsmethode	Zielgrößen
<b>1D</b> 	Hauptströmung Querschnitts- und Tiefenmittelung $h(x,t)$ $u(x,t)$ 
<b>2D</b> 	Ebene Verteilung $h(x,y,t)$ $u(x,y,t)$ $v(x,y,t)$ 
<b>3D</b> 	Räumliche Verteilung $h(x,y,z,t)$ bzw. $p(x,y,z,t)$ $u(x,y,z,t)$ $v(x,y,z,t)$ $w(x,y,z,t)$ 

Abbildung 2-13: Modellierungsmethode 1D, 2D oder 3D

Strömungen können nicht nur nach ihrer räumlichen Dimension (3D, 2D, 1D) sondern auch nach der Zeitabhängigkeit des Abflussgeschehens (stationär, instationär) unterschieden werden. Um eine stationäre Strömung handelt es sich, wenn die Geschwindigkeit des Wassers bzw. der Durchfluss in dem Modellgebiet unabhängig von der Zeit sind. Wenn über die Zeit Veränderungen der Strömungscharakteristik auftreten, bezeichnet man das Strömungsverhalten als instationär. Extrem instationäre Fließvorgänge sind z. B. die Flutung von Hochwasserrückhaltebecken, der Ablauf einer Hochwasserwelle, Deichbruchszenario, Betrieb von Staustufen, Schwall- und Sunkwellen bei Schleusungsprozessen.

Die wesentlichen Anforderungen an ein hydrodynamisch-numerisches Modell sind:

- Genauigkeit bzw. naturgetreue Wiedergabe der maßgebenden physikalischen Prozesse
- Schnelligkeit (kurze Rechenzeiten)
- Einfache Bedienung

Je nach Anwendungsfall bestehen unterschiedlich hohe Ansprüche an das numerische Modell, die Modellierungsmethode (1D, 2D oder 3D, stationär, instationär) und die Kalibrierung bzw. Validierung des Modells. Beim Einsatz numerischer Verfahren gilt allgemein der Grundsatz nicht so genau wie möglich zu modellieren, sondern so genau wie notwendig. Dadurch kann der Berechnungsaufwand deutlich reduziert werden. Die Auswahl eines geeigneten Modells hängt nicht nur allein von der Modellanwendung und der Strömungscharakteristik ab, sondern auch von den im Rahmen der Untersuchung geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Geschwindigkeit, Feststofftransport etc.), der Größe des Untersuchungsgebietes und von den vorhandenen Datengrundlagen (Topographie, Messdaten).

### 2.2.3 Grundgleichungen der Hydrodynamik

Eine natürliche Strömung in Oberflächengewässern ist in der Regel dreidimensional, reibungsbehaftet, turbulent und instationär. Ein hydrodynamisch-numerisches Modell beschreibt diese Strömungsvorgänge in Gewässern auf Grundlage von physikalischen Grundgleichungen, den sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen und der Kontinuitätsgleichung. Diese hydrodynamischen Grundgleichungen der Massen- und Impulsbilanz werden - unter der Annahme der Inkompressibilität des Fluides Wasser und unter Zugrundelegung eines ortsfesten kartesischen Koordinatensystems im Inertialsystem - aufgestellt.

Aus der Betrachtung der Massenflüsse ( $\partial m / \partial t = 0$ ) an einem dreidimensionalen Kontrollvolumenelement (in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung) und Division durch das Kontrollvolumen, folgt die allgemeine Kontinuitätsgleichung (stationäre Strömungen) für ein infinitesimal kleines Raumelement in Differentialform in kartesischen Koordinaten zu:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad [2-14]$$

$u, v, w$     Geschwindigkeit in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung [m/s]

$x, y, z$     Richtungskomponente in der jeweiligen Strömungsrichtung [m]

$\rho$         Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]

Die zeitliche Änderung des Impulses  $\partial(m\vec{u})/\partial t$  in einer Richtung ist gleich der Summe der extern angreifenden Kräfte  $\sum \vec{F}$  (Volumenkräfte und Oberflächenkräfte) auf das Kontrollvolumenelement in dieser Richtung. Die Erhaltungssätze für den Impulsstrom  $\partial(m\vec{u})/\partial t = \sum \vec{F}$  führen auf die Navier-Stokes-Gleichungen für die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung. Bei den Gleichungen handelt es sich um gekoppelte, nicht lineare, partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die im Allgemeinen nicht analytisch lösbar sind.

Die Navier-Stokes-Gleichung in x-Richtung lässt sich wie folgt schreiben:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigungskräfte}} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Druckkräfte}} - \underbrace{\rho \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right)}_{\text{Reibungskräfte}} \right] + \underbrace{g_x}_{\text{Volumenkräfte}} \quad [2-15]$$

$u, v, w$  Geschwindigkeit in x-, y- und z-Richtung [m/s]

$x, y, z$  Richtungskomponente in der jeweiligen Strömungsrichtung [m]

$\rho$  Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]

$p$  Hydrostatischer Druck [N/m<sup>2</sup>]

$\nu$  Kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

$g$  Erdbeschleunigung [9,81 m/s<sup>2</sup>]

Durch getroffene Annahmen, wie z. B. Mittelung der Turbulenz, hydrostatische Druckverteilung, Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz, gleichförmige vertikale bzw. transversale Geschwindigkeitsverteilung sowie stationäre (zeitunabhängige) und gleichförmige Strömungsverhältnisse, können die dreidimensionalen Grundgleichungen zur vollständigen Beschreibung der Strömungsvorgänge zunehmend vereinfacht werden (siehe Abbildung 2-14).

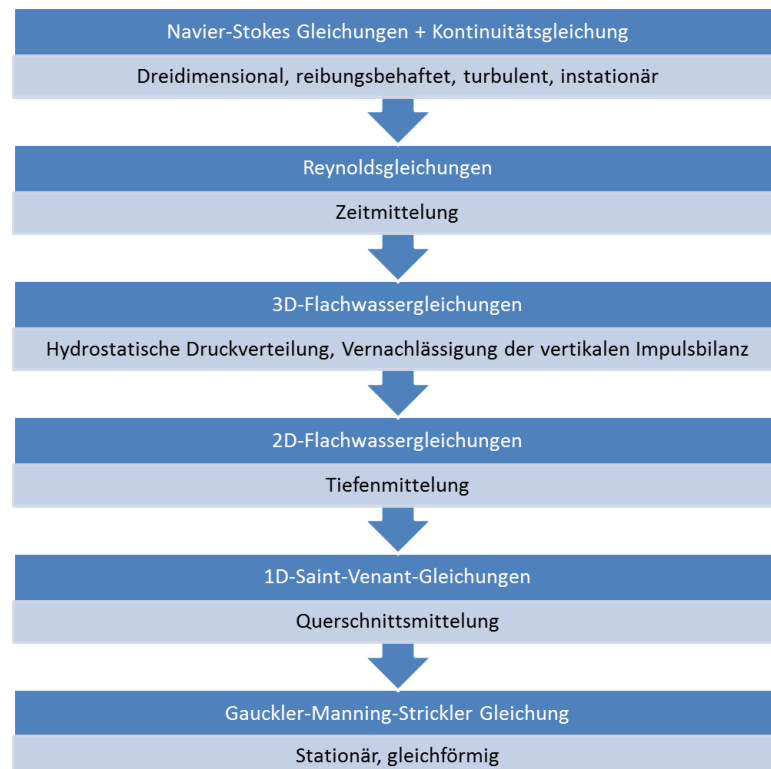


Abbildung 2-14: Grundgleichungen im Wasserbau

Die Zulässigkeit dieser Vereinfachungen der Grundgleichungen ist vor dem Hintergrund der bereits im vorigen Kapitel genannten Merkmale der Modellanwendung, der Strömungscharakteristik (1D, 2D oder 3D), den Zielgrößen, der Modellgebietsgröße und den Datengrundlagen entsprechend abzuwägen und zu prüfen. Je nach Fragestellung und Anwendungsfall ermöglicht dies eine Reduzierung der Berechnungszeiten bei häufig ausreichender Genauigkeit.

Eine umfassende Darstellung und eingehende Erläuterung der Grundgleichungen sind zu finden in *Ferziger, Peric, 1996 [30]* bzw. *2008 [31]*, *Malcherek, 2001 [59]*, *Durst, 2006 [27]*, *Martin, 2011 [61]* und *Musall, 2011 [62]*. Weitere Informationen zur Herleitung der hydrodynamischen Grundgleichungen und deren Vereinfachungen, Diskretisierung sowie den erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen, können ergänzend dem Anhang 2 entnommen werden.

### 2.2.4 Modellgüte und Fehlerquellen

Bei der Strömungssimulation ist die Modellgüte im Wesentlichen abhängig von der Genauigkeit und Menge der vorhandenen Geometriedaten sowie der Wasserspiegelfixierungen und zugehörigen Abflussmessungen, die für die Kalibrierung und Validierung des Strömungsmodells zur Verfügung stehen. Bei der Modellgenauigkeit unterscheidet man zwischen absoluter und relativer Genauigkeit. Die absolute Genauigkeit bezieht sich auf die berechnete hydraulische Kenngröße, z. B. die Wasserspiegellage und deren Vergleich mit gemessenen Daten. Der Fehler ist die Abweichung berechneter von gemessenen Werten. Die relative Genauigkeit bezieht sich auf den Vergleich zweier berechneter hydraulischer Kenngrößen (z. B. Istzustand und Variante), wodurch eine höhere Genauigkeit erreicht wird. Die Genauigkeit eines Modells ist nicht so einfach zu bestimmen, denn in den Vergleich gehen z. B. auch Mess- oder Anwendungsfehler ein, die nicht mit dem Modell zusammenhängen. Ein Modell wird nie abschließend kalibriert bzw. validiert sein, da jeder Vergleich mit neuen Messungen weitere Erkenntnisse mit sich bringen wird. Für den Anwender sind gerade die Schritte der Kalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalysen von besonderer Bedeutung, um die Güte des Modells beurteilen zu können.

Mit der Auflistung möglicher Fehlerquellen soll darauf hingewiesen werden, dass eine Abweichung der Berechnungswerte von den gemessenen Werten bzw. der Realität zahlreiche Ursachen haben kann:

- Modellfehler bzw. Fehler durch Annahmen in den Grundgleichungen (z. B. durch Vereinfachen der instationären, dreidimensionalen Gleichungen)
- Fehler durch Diskretisierung der exakten Differentialgleichungen zu numerisch lösbaren Differenzengleichungen; Fehler durch räumliche (100 m Abstand der Querprofile bzw. Berechnungsgitterabstände) und zeitliche Auflösung
- Fehler in den Berechnungen durch Iteration und Rundung
- Fehler im numerischen Code des Berechnungsprogramms
- Fehler in den Eingabedateien (z. B. Änderungen in der Topographie nicht berücksichtigt, verwendete Interpolation zwischen Querprofilen, pauschaler Rauheitsbeiwert, Koordinatentransformation)

- Fehler in der Modellbildung  
(z. B. Vernetzung, Bruchkanten, senkrechte Durchströmung nicht für ganzes Abflussspektrum gewährleistet)
- Unscharfe Datenerhebung bzw. Messfehler in den Naturmessungen  
(z. B. durch Wellenschlag, fehlerhafte Bedienung, Koordinatentransformation)
- Fehler durch den Benutzer bei der Verwendung der Software

Bei der Anwendung numerischer Modellverfahren muss sich der Anwender den oben beschriebenen potentiellen Fehlerquellen stets bewusst sein und diese durch Sensitivitätsanalysen oder durch Vergleich mit anderen Modellverfahren im Hinblick auf die Modellaussage abschätzen und eingrenzen können. Numerische Verfahren stellen immer eine Näherungslösung dar.



### 3 Verfahren, Dienste und Untersuchungen zum Thema Befahrbarkeit

Unterschiedliche Methoden (WSV, 2010 [84]) wie u. a. die Unfallanalyse, die Befragung Schifffahrtstreibender oder eine geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse geben Hinweise und Raum zur Interpretation der Befahrbarkeit einer Wasserstraße. Die Anwendung fahrdynamischer Verfahren und der Einsatz von Strömungsmodellen sind bei der Bearbeitung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen längst von großer Bedeutung und nicht mehr wegzudenken. Ergänzend sind selbstverständlich die Erkenntnisse aus Naturuntersuchungen oder der physikalischen Modellierung hervorzuheben.

Die Komplexität des Zusammenspiels zur Befahrbarkeit zeigt Abbildung 3-1, in der verschiedene Aspekte und Komponenten einer Wasserstraße, eines Schiffes bzw. einer Fahrrinne, eines einheitlichen Bezugssystems und weiterer Informationen zur Bestimmung und Bewertung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen dargestellt sind. Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, stellt die Problematik und Komplexität jedoch anschaulich dar.



Abbildung 3-1: Verschiedene Aspekte und Komponenten der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen

Je nach Fragestellung und Zielsetzung wird die Befahrbarkeit einer Binnenwasserstraße auf unterschiedliche Weise ermittelt. Dies kann durch Naturuntersuchungen (*Feierfeil, 2015 [29]*), Messungen im Labor, Anwendung fahrdynamischer und hydrodynamisch-numerischer Verfahren (*BAW, 2014 [8]*; *Gronarz, 2015 [38]*) oder durch den Einsatz unterstützender Systeme auf den Schiffen (*Hecht et al., 2009 [45]*), wie die Binnenschifffahrtsinformationsdienste sowie kombinierte Ansätze und Verfahren erfolgen. Dabei werden z. T. sehr unterschiedliche Methoden und verschiedene Eingangsdaten verwendet. Je nach Anforderungen an die Wasserstraßen wurden so im Laufe der Zeit etliche Verfahren unterschiedlicher Komplexität entwickelt, um die Frage- und Problemstellungen an den Wasserstraßen lösen zu können.

Es wurden u. a. Verfahren und Dienste in der Infrastrukturplanung, zur Aus- / Weiterbildung und Binnenschiffsentwicklung oder Unfallermittlung / -prävention (*Verein für europäische Binnenschiffahrt und Wasserstraßen e. V., 2014 [80]*), aber auch zur Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung der Schifffahrt entwickelt (*WSV, 2003 [82]*). Manche Verfahren sind z. B. für klein-, andere für großräumige Untersuchungen geeignet. Wieder andere berücksichtigen z. B. die Strömungsinformationen des Gewässers nicht oder nur in reduzierter Form auf eine Hauptströmungsrichtung ohne Berücksichtigung von Querströmungen (*WSV, 2010 [84]*). Eine Ermittlung der Befahrbarkeit ist zudem auch von internationaler Relevanz. Dies zeigt sich in der verstärkten Beteiligung europäischer und internationaler Arbeitsgruppen (z. B. GNS - Good Navigation Status oder PIANC Inland Navigation Commission u. a. Design Guidelines for Inland Waterways, Inland Navigation Safety, e-Navigation for Inland Waterways) mit Themen rund um die Binnenschiffahrt, die Binnenwasserstraßen sowie deren Infrastruktur.

Ein allgemeingültiges und ganzheitliches Verfahren zur flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen wurde bislang nicht umgesetzt und dessen Entwicklung wurde im Rahmen der Dissertation angestrebt (Kapitel 4). Der Schritt nautisch relevante Informationen (u. a. Strömungskenngrößen, Schiffs- bzw. Fahrrinnenanforderungen, Verkehrsregeln) in flächenhafte Informationen zu überführen und zu kombinieren, ermöglicht die Visualisierung der Befahrbarkeit und anschließend eine Beurteilung und Bewertung von z. B. Gewässerabschnitten, Fahrrinnen oder aufgezeichneten bzw. simulierten Schiffsfahrten. Die Ergebnisse des Bewertungsverfahrens *RiNA* (*River Navigation Assessment*) können sowohl zu Planungszwecken genutzt als auch für die Schifffahrt aufbereitet und unterstützend in Form eines Informationsdienstes bereitgestellt werden.









In den folgenden Kapiteln werden die Verfahren und Dienste erläutert, welche die Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* und die Visualisierung der Ergebnisse geprägt haben. In Kapitel 3.1 wird ein Klassifizierungssystem für Wasserstraßen vorgestellt, welches sich auf die Abmessungen von Binnenschiffstypen konzentriert und Gültigkeit für die europäischen Binnenwasserstraßen besitzt. Bei der Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* wurden vorhandene Großausführungsmessungen dieser Binnenschiffstypen ausgewertet und zur Validierung des Verfahrens sowie zur Berücksichtigung des fließenden Verkehrs genutzt. Binnenschifffahrtsinformationsdienste dienen im Wesentlichen der Unterstützung der Schifffahrt und werden weniger zu Planungszwecken eingesetzt. Kapitel 3.2 beschreibt die elektronischen Navigationskarten (Inland ENC) als ein wesentlicher Baustein des Elektronischen Kartenanzeige- und Navigations-Information-Systems im Binnenbereich

(Inland ECDIS). Die Inland ENC ist eine ideale Schnittstelle um die Ergebnisse des Bewertungsverfahrens *RiNA* kombiniert darzustellen und den Schiffsführern bereitzustellen. Des Weiteren werden in dem Verfahren nautisch relevante Informationen aus der Inland ENC interpretiert und berücksichtigt. Eine Abschätzung des Verkehrsflächenbedarfs eines Schiffes ist für eine Erweiterung des Verfahrens vom ungestörten auf den fließenden Verkehr erforderlich. In Kapitel 3.3 werden deshalb fahrdynamische Verfahren unterschiedlicher Komplexität u. a. zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs erläutert.

### 3.1 Klassifizierungssystem für Binnenwasserstraßen

Bereits im Jahr 1993 wurde durch Erlass des Bundesverkehrsministeriums in Deutschland ein europäisches Klassifizierungssystem für die Binnenwasserstraßen eingeführt, um ein einheitliches europäisches Wasserstraßennetz zu fördern. Das Klassifizierungssystem bezieht sich im Wesentlichen auf die Hauptabmessungen (Länge und Breite) des Schiffes. Je nach Abmessungen gängiger Schiffstypen wird die Binnenwasserstraße, für die das Schiff zugelassen ist, einer Wasserstraßenklasse von I bis VII zugeordnet (siehe Tabelle 3-1). Die Fußnoten in der Tabelle können dem Anhang 1 entnommen werden.

Tabelle 3-1: Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen<sup>3</sup>

Typ der Binnenwasserstraße	Klasse der Binnenwasserstraße	MOTORSCHIFFE UND SCHLEPPKÄHNE Typ des Schiffes: Allgemeine Merkmale					SCHUBVERBÄNDE Art des Schubverbandes: Allgemeine Merkmale					Brückendurchfahrts- höhe m <sup>2)</sup>	Graphisches Symbol auf der Karte
		Bezeichnung	maxim. Länge L (m)	maxim. Breite B (m)	Tiefgang d (m) <sup>2)</sup>	Tonnage T (t)	Formation	Länge L (m)	Breite B (m)	Tiefgang d (m) <sup>2)</sup>	Tonnage T (t)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VON REGIONALER BEDEUTUNG WESTLICH DER ELBE ÖSTLICH DER ELBE	I	Penische	38,5	5,05	1,8-2,2	250-400						4,0	=====
	II	Kempenaar	50-55	6,6	2,5	400-650						4,0-5,0	=====
	III	Gustav Koenigs	67-80	8,2	2,5	650-1 000						4,0-5,0	=====
	I	Gross Finow	41	4,7	1,4	180						3,0	=====
	II	BM-500	57	7,5-9,0	1,6	500-630						3,0	=====
	III	e)	67-70	8,2-9,0	1,6-2,0	470-700		118-132 <sup>1)</sup>	8,2-9,0 <sup>1)</sup>	1,6-2,0	1 000-1 200	4,0	=====
VON INTERNATIONALER BEDEUTUNG	IV	Johann Welker	80-85	9,50	2,50	1 000-1 500		85	9,50 <sup>2)</sup>	2,50-2,80	1 250-1 450	5,25 od. 7,00 <sup>4)</sup>	=====
	V a	Große Rheinschiffe	95-110	11,40	2,50-2,80	1 500-3 000		95-110 <sup>1)</sup>	11,40	2,50-4,50	1 600-3 000	5,25 od. 7,00 od. 9,10 <sup>4)</sup>	=====
	V b							172-185 <sup>1)</sup>	11,40	2,50-4,50	3 200-6 000	9,10 <sup>4)</sup>	=====
	VI a							95-110 <sup>1)</sup>	22,80	2,50-4,50	3 200-6 000	7,00 od. 9,10 <sup>4)</sup>	=====
	VI b	e)	140	15,00	3,90			185-195 <sup>1)</sup>	22,80	2,50-4,50	6 400-12 000	7,00 od. 9,10 <sup>4)</sup>	=====
	VI c						 	270-280 <sup>1)</sup> 195-200 <sup>1)</sup>	22,80 33,00-34,20 <sup>1)</sup>	2,50-4,50 2,50-4,50	9 600-18 000 9 600-18 000	9,10 <sup>4)</sup>	=====
	VII							285 <sup>1)</sup>	33,00-34,20 <sup>1)</sup>	2,50-4,50	14 500-27 000	9,10 <sup>4)</sup>	=====

<sup>3</sup> [http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg\\_rhein/technische\\_daten/Wasserstrassenklasse.html](http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg_rhein/technische_daten/Wasserstrassenklasse.html)  
abgerufen am 01.08.2016

Anhand der Zuordnung der Wasserstraßenklasse erkennt man, welche Schiffsabmessungen auf der Binnenwasserstraße verkehren können. Grundlage für die Klassifizierung bilden die für die jeweilige Wasserstraße gültige Polizeiverordnung der Stromkommissionen (z. B. am Rhein die von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt „ZKR“ beschlossene Rheinschifffahrtspolizeiverordnung RheinSchPV; WSV, 2014 [86]), in der die Höchstabmessungen der Fahrzeuge, Schubverbände und sonstiger Fahrzeugzusammenstellungen geregelt sind.

Die zugelassenen Höchstabmessungen sind z. T. historisch bedingt, da zunächst Sondererlaubnisse für Fahrzeuge mit entsprechender Länge für Probefahrten erteilt und nach erfolgreicher Erprobung genehmigt wurden. Aber auch die Abmessung einer Schleuse kann die einschränkende Größe der Höchstabmessungen der Fahrzeuge an einer Binnenwasserstraße sein. In Deutschland wird eine Liste mit den Längen der Hauptschifffahrtswege der Binnenwasserstraßen des Bundes und eine Zuordnung der dem allgemeinen Verkehr dienenden Binnenwasserstraßen zu den Wasserstraßenklassen jährlich aktualisiert (BMVI, 2015 [14]).

## 3.2 Binnenschifffahrtsinformationsdienste

Die Binnenschifffahrtsinformationsdienste bzw. international die „River Information Services“ (RIS) haben das Ziel, zu einem sicheren und effizienten Beförderungsablauf und damit zu einer intensiven Nutzung der Binnenwasserstraßen beizutragen (*Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2013 [89]*). Es handelt sich um Informationsdienste zur Unterstützung des Verkehrs- und Transportmanagements in der Binnenschifffahrt, einschließlich der Schnittstellen zu anderen Transportarten. Eine Basis zur europaweiten Einführung bildet die *Richtlinie 2005/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. September 2005 über harmonisierte Binnenschifffahrtsinformationsdienste (RIS) auf den Binnenwasserstraßen der Gemeinschaft* (Europäische Union, 2005 [28]).

Die Wasserstraßenverwaltung Deutschlands z. B. stellt kostenfrei einen internetbasierten Dienst mit Informationen und Hinweisen für alle Schifffahrtstreibenden auf Binnenwasserstraßen und sonstigen Interessenten zur Verfügung. Unter ELWIS (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice) werden u. a. Nachrichten für die Binnenschifffahrt (z. B. Verkehrsinformationen), gewässerkundliche Informationen (z. B. Wasserstände und Hochwasservorhersagen), Schifffahrtsrecht (z. B. Gesetze und Rechtsverordnungen), Daten und Fakten der Binnenwasserstraßen (z. B. Klassifizierungssystem, technische Daten) und aktuelle Informationen veröffentlicht. Nutzer von ELWIS haben zudem die Möglichkeit, ausgewählte Informationen (z. B. aktuelle Wasserstandinformationen, elektronische Navigationskarten) zu abonnieren und per Email zu empfangen.

Zur verkehrstechnischen Optimierung des Systems Schiff / Wasserstraße sowie zur Verbesserung der Verkehrssicherungspflicht, sind bereits einige Telematikanwendungen bzw. Dienste, so z. B. das Electronic Chart Display and Information System für den Binnenbereich (Inland ECDIS, Kapitel 3.2.1) und die Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC, Kapitel 3.2.2) entstanden und international eingeführt. Die Entwicklung der Binnenschifffahrtsinformationsdienste geht hin zur möglichst

zeitnahen Bereitstellung aktueller und /oder prognostizierter Informationen für die Binnenschifffahrt zur Planung der Fahrt und gleichzeitig zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit.

### 3.2.1 Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation (Inland ECDIS)

Bei einem ECDIS handelt es sich um ein Elektronisches Kartenanzeige- und Navigations-Informationssystem zur Unterstützung des Schiffsführers bei der Reiseplanung und -überwachung, und auf Wunsch, Anzeige von navigationsbezogenen Informationen. Die Fähigkeiten eines ECDIS gehen weit über die bildliche Darstellung von Papierkarten hinaus. (Hecht et al., 1999 [44] und 2009 [45])

Das ECDIS verbindet die computergestützte Verarbeitung und Darstellung von elektronischen Informationen für den Schifffahrtzweck. Es führt Karten, Positionsbestimmungssysteme, Sensoren (Radar, Echolot) und andere, für eine sichere Schiffführung notwendige Informationen, in einem System zusammen (siehe Abbildung 3-2).

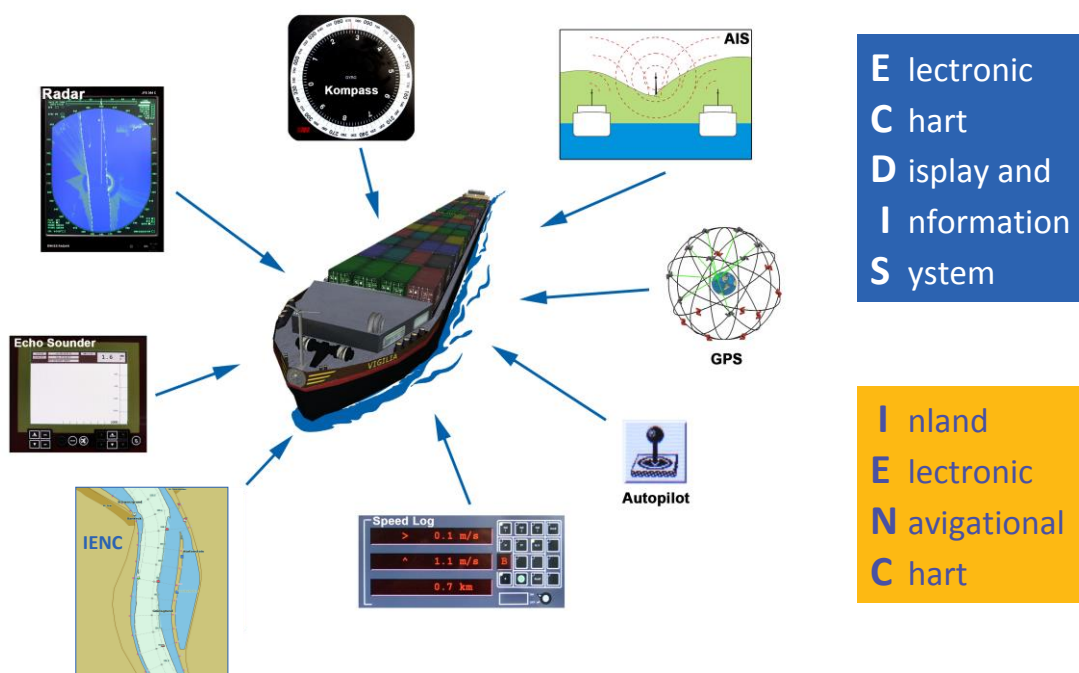


Abbildung 3-2: Darstellung eines Electronic Chart Display and Information Systems for Inland Navigation

Durch die rasante Entwicklung im Bereich der Elektronik, Ortungstechnologie (GPS), Kommunikationstechnik (Internet), RIS-Technologien (Automatic Identification System AIS, Radar, Inland ENC, ...) und der Computertechnologie, befindet sich das ECDIS in einer ständigen Weiterentwicklung. Bereits Anfang der 90er Jahre hat sich das ECDIS in der Seeschifffahrt entwickelt und als äußerst hilfreiches und inzwischen unverzichtbares nautisches Hilfsmittel etabliert. Seit 2001/2002 wird das für den maritimen Bereich entwickelte ECDIS-Konzept in angepasster Form für die Binnenschifffahrt (Inland ECDIS) umgesetzt. Seit 2003 ist das Inland ECDIS-Konzept europäischer und inzwischen sogar weltweiter Standard für die Binnenschifffahrt. Seit 2012 besteht auf deutschen

Flüssen ECDIS-Ausrüstungspflicht auf neuen Passagierschiffen mit einer Bruttoreaumzahl (BRZ) von über 500 und bei Tankern von über 3000 BRZ.

#### 3.2.2 Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC)

Die elektronischen Navigationskarten (Inland ENC) sind ein wesentlicher Baustein des Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation (Inland ECDIS). Im Jahr 2003 wurde mit der Standardisierung der Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC) nicht nur ein Beitrag zur Harmonisierung der Schifffahrt in Europa geschaffen. Mit der Definition eines einheitlichen Datenaustauschformates - den „Transfer Standard for Hydrographic Data“ (S-57 Datenstandard) durch die International Hydrographic Organization (IHO) - wurde es ermöglicht, Daten weltweit kompatibel und damit austauschbar zu machen. Die elektronischen, vektorbasierten Navigationskarten müssen standardisiert bezüglich Inhalt, Struktur und Format vorliegen. Künftig soll der neue IHO „Geospatial Standard for Hydrographic Data“ (z. B. S-100 bzw. S-101) eingesetzt werden, der sowohl Vektor- als auch Rasterinformationen verarbeiten kann.

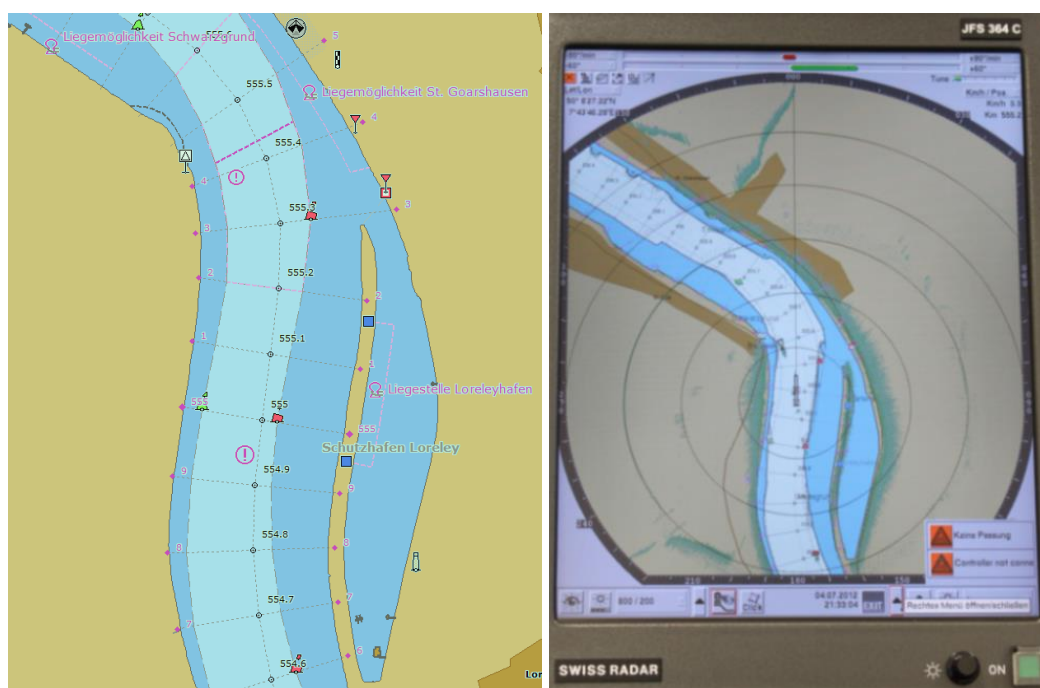


Abbildung 3-3: Inland ENC eines Rheinabschnittes im Bereich des Loreleyhafens (links) und Überlagerung mit dem Radarbild (rechts)

Eine elektronische Navigationskarte beinhaltet u. a. Informationen zu Uferlinien (z. B. bei einem Mittelwasserabfluss), Bauwerken am und im Gewässer (Buhnen, Leitwerke, Schleusen, Wehre), offizielle Schifffahrtszeichen (Tonnen, Baken, Lichtzeichen, Tafelzeichen), Fahrrinnengrenzen (falls vorhanden), isolierte Gefahrenstellen in der Fahrrinne unter und über Wasser, Wasserstraßenachse mit Kilometern und Hektometern (siehe Abbildung 3-3, links). (ZKR, 2006 [88] und CCNR, 2011 [21]) Eine Inland ENC kann mit einem Radarbild überlagert werden (siehe Abbildung 3-3, rechts) und somit die Schiffsführer - auch bei schlechten Sichtverhältnissen bzw. in der Nacht - bei der Navigation unterstützen.



Der Inland ECDIS Standard ermöglicht es eine Vielzahl von Objekten darzustellen und mit Sachdaten zu beschreiben, um eine Erhöhung der Sicherheit des Binnenschiffsverkehrs in Bezug auf Schiffsführung, Reiseplanung und -überwachung zu ermöglichen. Eine Inland ENC enthält alle wesentlichen Karteninformationen und kann auch zusätzliche Informationen (im Vergleich zu denen in der Papierkarte) wie z. B. Strömungsinformationen darstellen, die für eine sichere Navigation als wichtig angesehen werden können. In Kapitel 3.2.2.1 und Kapitel 3.2.2.2 werden Tiefen- und Fließgeschwindigkeitsinformationen in der Inland ENC exemplarisch vorgestellt und welchen Nutzen diese für die Binnenschifffahrt haben können.

### 3.2.2.1 Tiefeninformationen in der Inland ENC

In der Inland ENC können Tiefeninformationen als Punkt- („Soundings“), Linien- („Depth Contours“) oder Flächenobjekte („Depth Areas“) dargestellt werden. Grundlage für die Ermittlung der Tiefeninformationen sind die ausgewerteten Peilerggebnisse mit denen auch die Strömungsmodelle aufgebaut bzw. die Bathymetriedaten aktualisiert werden. Die Fließtiefeninformationen können den Schiffsführern flächig bereitgestellt werden.

Am Beispiel des Rheins geht eine Niedrigwasserspiegellage, der gleichwertige Wasserstand (GIW) als Referenz über die Differenz mit den Peilungsdaten in die Tiefeninformationen für die Inland ENC ein (siehe Abbildung 3-4).

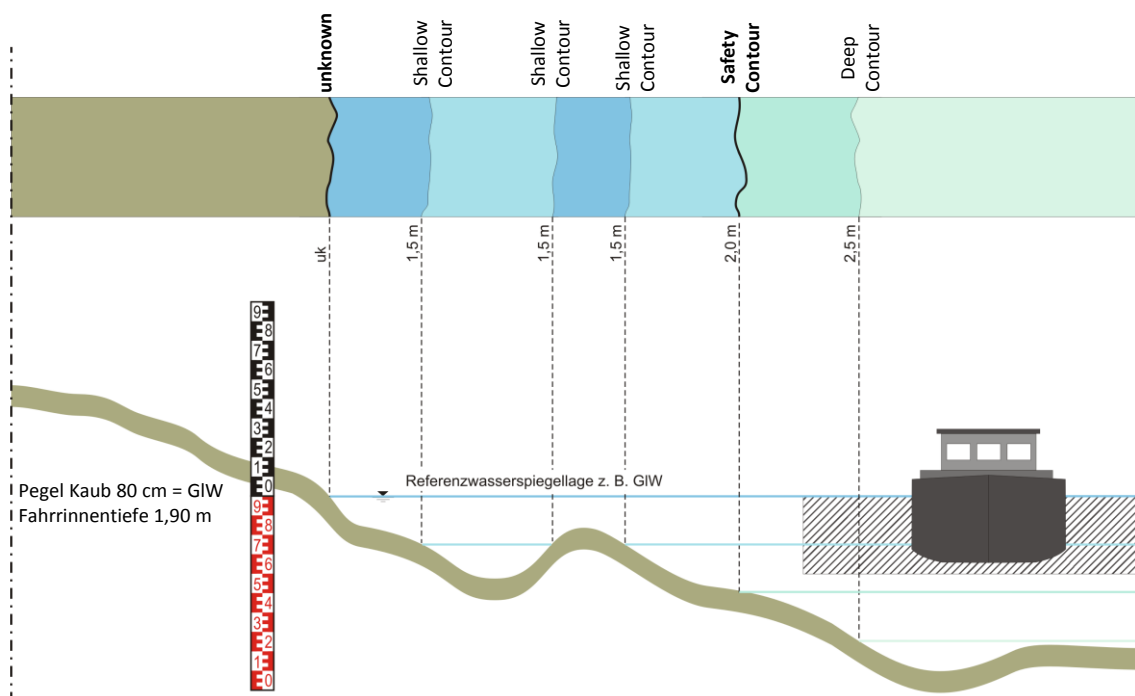


Abbildung 3-4: Exemplarische Darstellung eines Profilquerschnitts mit Referenzwasserspiegellage und Umsetzung der Tiefeninformationen in der Inland ENC im Vierfarbenmodus (Harlacher, Zentgraf, 2013 [40])

Nach dem ECDIS Standard hat der Schiffsführer zwei Möglichkeiten in der Darstellung der Farbschattierungen des benetzten Bereichs in der Inland ENC (siehe Abbildung 3-5). Im Zweifarbenmodus wird anhand der „Safety Contour“ in nicht befahrbare und befahrbare Gebiete unterschieden. Der Schiffsführer stellt seine „Safety Contour“ (z. B. 2,0 m) selbst ein. Im Vierfarbenmodus kann zusätzlich durch die Angabe der entsprechenden „Deep Contour“ und „Shallow Contour“ in befahrbaren und nicht befahrbaren Gebieten, jeweils zwischen zwei Farben, differenziert werden. Der Schiffsführer kann die Darstellungsart auswählen.

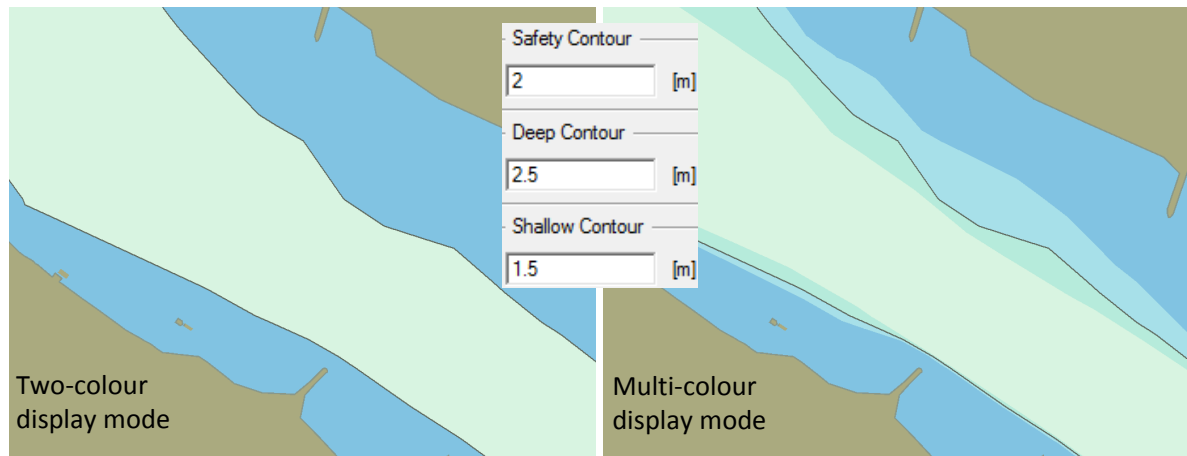


Abbildung 3-5: Farblich abgestufte Tiefeninformationen in der Inland ENC exemplarisch dargestellt im Zweifarben- (links) und Vierfarbenmodus (rechts) (Harlacher, Zentgraf, 2013 [40])

Bei vorhandenen Tiefeninformationen kann der Schiffsführer die elektronischen Navigationskarten entsprechend der Abladung seines Schiffes inklusive der dynamischen Eintauchtiefe in beschränkten Fließgewässern, farblich abstufen. Er ist somit in der Lage die Einschränkungen der Fahrrinne abzuschätzen und kann seine Fahrt darauf abstimmen.

Man unterscheidet Tiefen-Inland ENC mit festem Bezugswasserstand oder mit dynamischen Pegelhöhen (tagesaktuelle Wassertiefen). Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass mit steigendem Abfluss die Wasserspiegellagen entlang eines betrachteten Fließgewässerabschnittes häufig nicht in gleichem Maße ansteigen. Anhand der berechneten Wasserspiegellagen bei Niedrig- (Pegel Kaub 80 cm), Mittel- (Pegel Kaub 224 cm) und Hochwasser (Pegel Kaub 460 cm und 640 cm) und deren Differenz mit der Niedrigwasserspiegellage, kann sowohl diese z. T. starke Ungleichwertigkeit als auch annähernde Gleichwertigkeit über das Abflussspektrum, zwischen Rhein-km 500,0 und 600,0, exemplarisch aufgezeigt werden (siehe Abbildung 3-6). Bereits bei dem Mittelwasserabfluss ist der ungleichmäßige Anstieg in der Differenz der Wasserspiegellagen erkennbar. Bis zu dem berechneten Mittelwasser liegen die Abweichungen der Differenzen entlang der Strecke im Dezimeterbereich. Bei den Hochwasserabflüssen ist die Ungleichwertigkeit in der Differenz der Wasserspiegellagen sehr deutlich erkennbar. Bei Rhein-km 515,0 beträgt die Differenz der Wasserspiegellage bei Hochwasser mit der Niedrigwasserspiegellage etwa 3,9 m, dagegen liegt die Differenz bei Rhein-km 555,0 fast bei 6 m. Die Wasserspiegellagen steigen sozusagen entlang einer Strecke mit zunehmendem Abfluss nicht überall gleichwertig an.



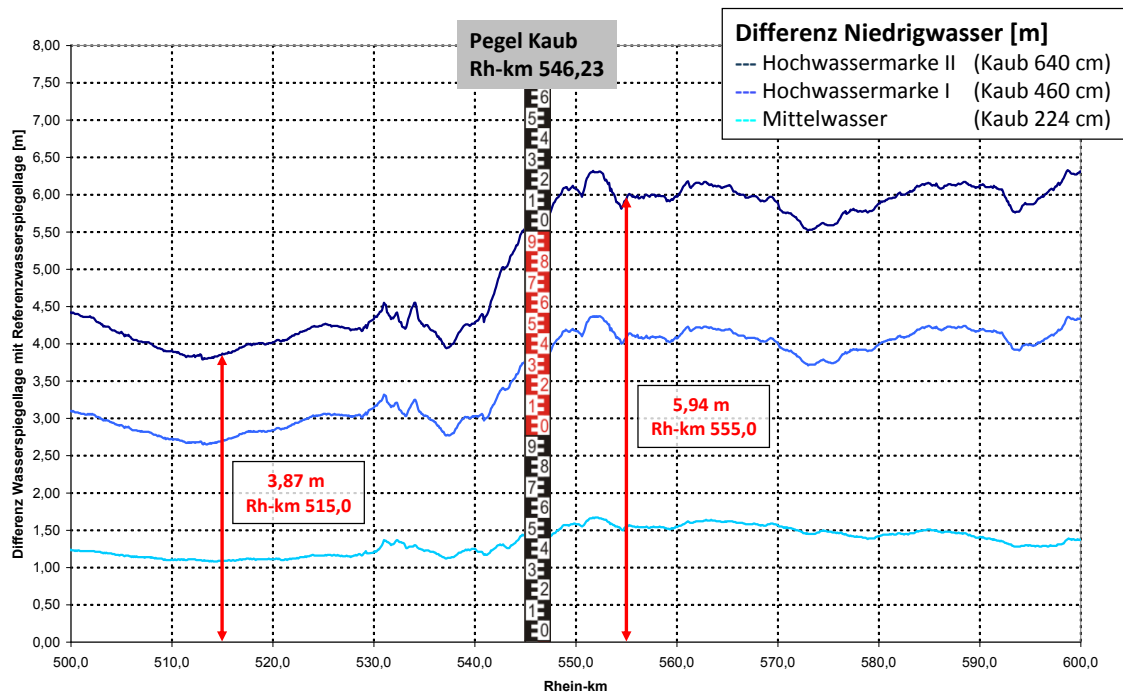


Abbildung 3-6: Differenz der Wasserspiegellagen bei Mittel- und Hochwasser mit der Referenzwasserspiegellage (Niedrigwasser) zwischen Rhein-km 500,0 und 600,0 (Harlacher, Zentgraf, 2013 [40])

Bei den Fließgewässerabschnitten die relativ gleichwertig ansteigen, kann mit zunehmendem Abfluss über die Differenz am Pegel auf die Zunahme bei den Tiefen geschlossen werden. Die aktuelle Wasserspiegellage wird anhand des für diesen Streckenabschnitt relevanten Bezugspegels eingestellt. Fließgewässerabschnitte die nicht gleichwertig mit zunehmendem Abfluss ansteigen, können in feinere Fließgewässerabschnitte mit Pegelbezug weiter untergliedert werden. Ist das nicht möglich, können entweder aus Wasserspiegellagenmodellen, sogenannte stationäre Wasserspiegellagenfächer hinterlegt, oder instationäre hydrodynamisch-numerische Modelle verbunden mit einer Online-Pegelabfrage zur Berechnung der aktuellen Wasserspiegellage vorgehalten und eingesetzt werden.

### 3.2.2.2 Fließgeschwindigkeitsinformationen in der Inland ENC

Fließgeschwindigkeitsinformationen können über Messungen und aus Berechnungen, z. B. aus einem hydrodynamisch-numerischen Modell, gewonnen werden. Der Nachteil bei der Messung von Fließgeschwindigkeiten liegt in dem vergleichsweise großen Aufwand, in der räumlichen Einschränkung und in der Begrenzung auf einen Abfluss. Bei der Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten mit HN-Modellen können die Geschwindigkeiten über das gesamte Abflussspektrum bereitgestellt werden.

Bei der Bereitstellung der Fließgeschwindigkeiten muss man zwischen lokalen Anwendungsbereichen (z. B. Zufluss, Querströmung und Gefahrenhinweise, siehe Abbildung 3-7) und streckenorientierten Anwendungsbereichen (großräumig auf die Querprofile oder detailliert auf die Fahrrinnenfläche bezogen) unterscheiden.

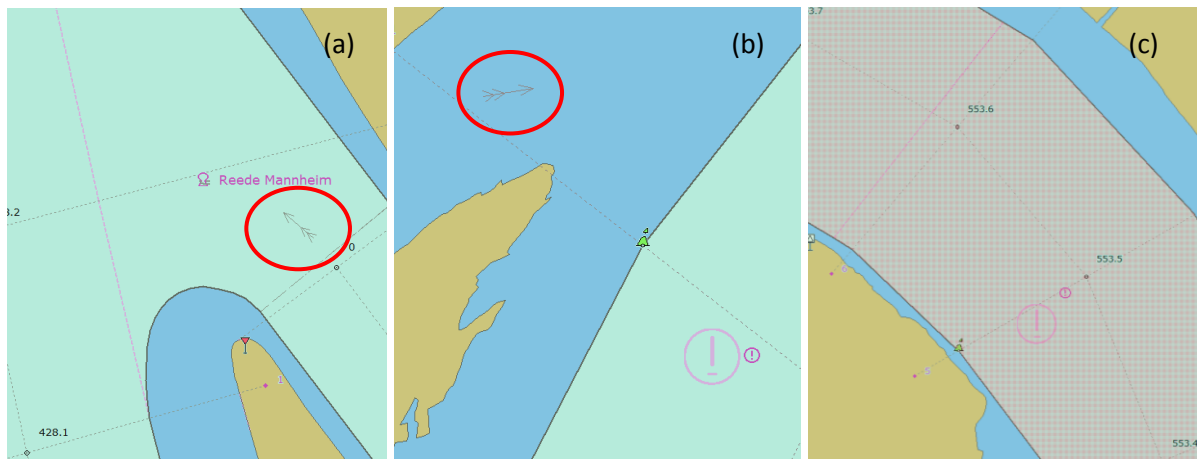


Abbildung 3-7: Lokale Anwendungsbereiche für die Darstellung bzw. Bereitstellung der Fließgeschwindigkeiten: (a) Zufluss (Einmündung von Nebenflüssen, Einleitungen etc.); (b) Wasserstand-abhängige Querströmungen (z. B. Tauberwerth bei Oberwesel); (c) Hinweis auf gefährliche Strömungen bei Hochwasser (z. B. Gefahrenzone am Betteck)

Für eine Reiseplanung und -überwachung ist es erforderlich, die mittleren Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne bei ausgewählten Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüssen an den Querprofilen (z. B. im 100 m Abstand, siehe Abbildung 3-8) bereitzustellen.

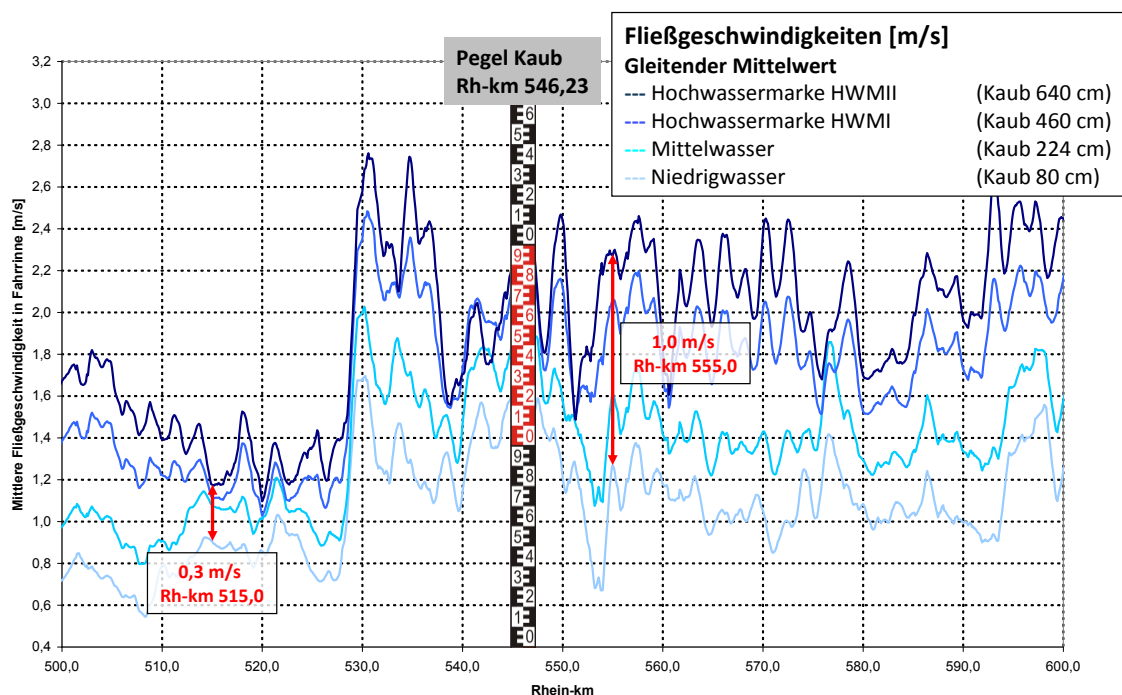


Abbildung 3-8: Mittlere Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasser zwischen Rhein-km 500,0 und 600,0 (Harlacher, Zentgraf, 2013 [40])

Die Fließgeschwindigkeiten in der Gebirgsstrecke (ab Rhein-km 529,0) sind deutlich höher als noch im Rheingau und hängen stärker von der Wasserführung des Rheins ab (siehe Abbildung 3-8). Bei Rhein-km 515,0 beträgt die Differenz der Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser mit der bei Niedrigwasser

rechnerisch etwa 0,3 m/s, dagegen liegt die Differenz bei Rhein-km 555,0 etwa bei 1 m/s. Es könnte z. B. ein fahrrinnenbezogener Fließgeschwindigkeitsfächer aus einem 1D-HN-Modell statisch hinterlegt oder dynamisch aus einem Onlinemodell bereitgestellt werden.

Die Fließgeschwindigkeitsinformationen können die Schiffsführer bei der Reiseplanung und -überwachung (Reisedauer, geschätzte Ankunftszeit, Begegnungsort/-zeit) unterstützen. Sie erleichtern die taktische Navigation in sogenannten Engpassbereichen und tragen somit zu einer Erhöhung der Sicherheit des Schiffsverkehrs bzw. zu einer Entschärfung der Unfallsituation bei. Eine Anpassung der Fahrgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Ankunftszeit und der Begegnungsorte bzw. -zeiten bewirkt indirekt eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und somit wird auch ein Beitrag zur Effizienz der Binnenschifffahrt und zum Schutz der Umwelt beigesteuert.

### 3.2.2.3 Fazit und Hinweise

Informationssysteme gewinnen in der Binnenschifffahrt immer mehr an Bedeutung. Eine Bereitstellung aktueller und / oder prognostizierter Strömungsinformationen über das Abflussspektrum (Onlineanbindung) für die Schifffahrtstreibenden an Engstellen, über größere Streckenabschnitte oder gar über das Wasserstraßennetz ist möglich. Hierfür ist ein flussstreckenbezogenes hydraulisches Konzept erforderlich. Die Veränderlichkeit der Wasserspiegellagen kann über geeignete Schnittstellen (z. B. Wasserspiegellagen aus einem Strömungsmodell und Pegelanbindung) im Inland ECDIS erfasst werden (siehe Abbildung 3-9).

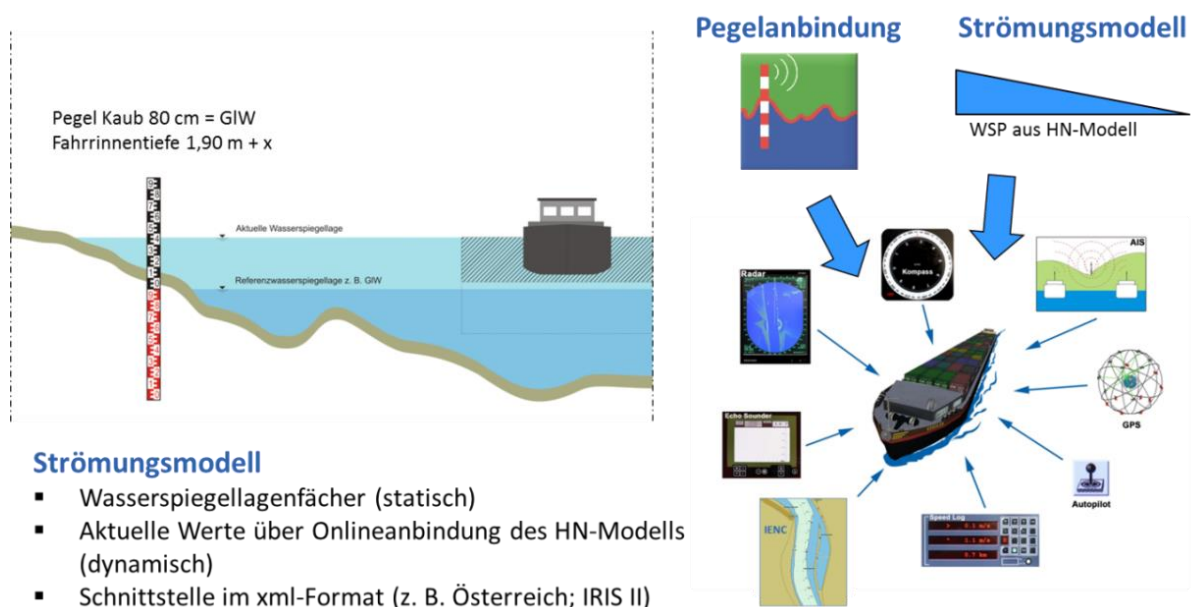


Abbildung 3-9: Erfassung der Veränderlichkeit der Wasserspiegellagen über geeignete Schnittstellen (Pegelanbindung, Strömungsmodell) im Inland ECDIS

Die Herausgabe elektronischer Navigationskarten mit Strömungsinformationen kann zu einer Entschärfung der Unfallsituation auf Binnenwasserstraßen beitragen. Strömungsinformationen sind

als alleiniges Navigationsmittel jedoch nicht geeignet. Mit den Strömungsinformationen ist der Schiffsführer in der Lage, die Einschränkungen der Fahrrinne einzuschätzen und seine Fahrt und Abladung (Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit der Transporte) darauf abzustimmen. Selbst Durchfahrtshöhen bei Brücken können ermittelt und bereitgestellt werden. Strömungsinformationen unterstützen die Schiffsführer bei der Schiffsführung, Reiseplanung und -überwachung und erleichtern die taktische Navigation in Engpassbereichen. Sie tragen zur Erhöhung der Sicherheit des Schiffsverkehrs und Effizienz der Binnenschifffahrt und damit zum Schutz der Umwelt bei. Um die Haftungsfrage zu klären, können die Nutzer ihre Zustimmung durch einen entsprechenden Haftungs- und Gewährleistungsausschluss, z. B. vor dem Abrufen der Tiefeninformationen, erklären.

#### 3.2.2.4 Tiefeninformationen zur Identifikation von Engpassstellen

Im Jahr 2003 wurden der Binnenschifffahrt erstmals für ausgewählte Engpassstellen des Rheins Tiefeninformationen, die über die Angabe der Solltiefe unter GIW (Bezugswasserstand: Gleichwertiger Wasserstand) hinausgehen, in einer elektronischen Karte als Navigationshilfe bereitgestellt (siehe Abbildung 3-10). Zuvor wurden nur Informationen in der Fahrrinne über die vorzuhaltende Solltiefe bezogen auf den GIW (siehe Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4) veröffentlicht. Die Tiefeninformationen sind essentiell für die Bewertung von Engpassstellen und zudem in Form eines Informationssystems nützlich für die Schiffsführer.

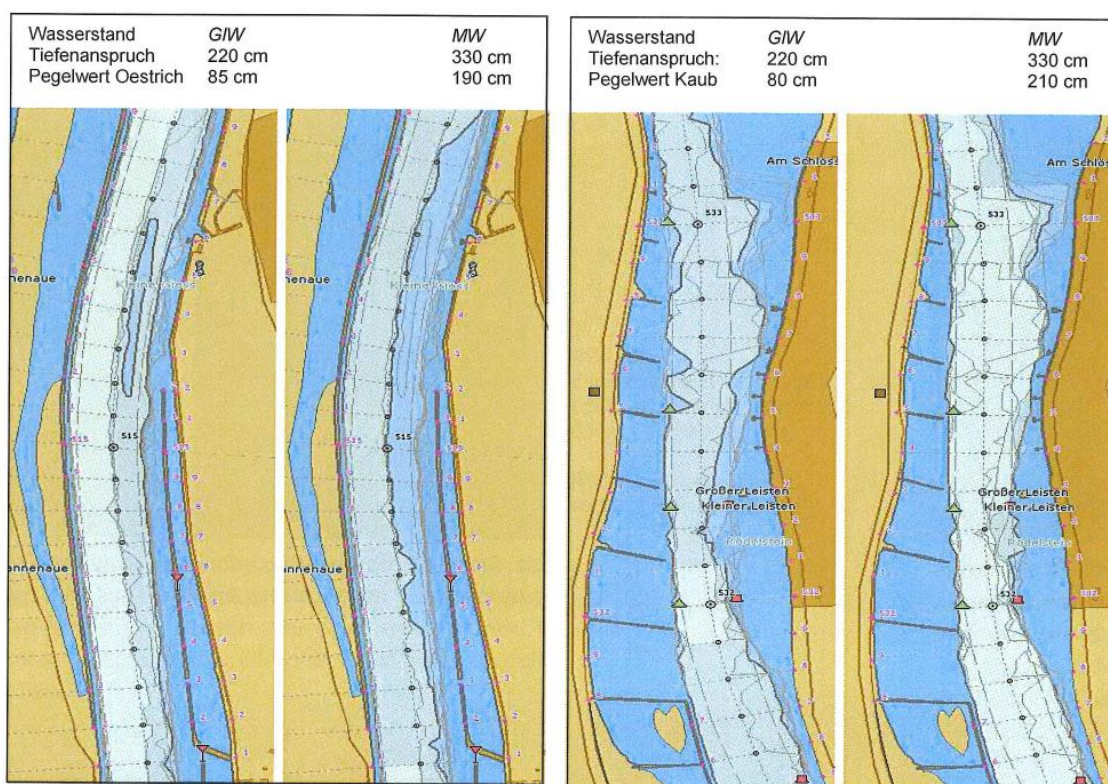


Abbildung 3-10: Engpassstelle I im Rheingau bei Hattenheim (links) und Engpassstelle VI in der Gebirgsstrecke bei Assmannshausen (rechts) im Niedrigwasserbereich (GIW) mit einem Tiefenanspruch von 2,2 m bzw. im Mittelwasserbereich (MW) mit einem Tiefenanspruch von 3,3 m (WSV, 2003 [82])



Gemäß dem Abschlussbericht der Projektgruppe Engpassanalyse (EPA) ist *„ein Engpass eine Stelle innerhalb der Wasserstraße, in der die Sicherheit und / oder Leichtigkeit der Schifffahrt eingeschränkt ist. Diese Einschränkung kann einen unterschiedlich großen Bereich umfassen, zeitlich verschieden sein und vielschichtige Ursachen haben. Der Engpass ist eine Schwachstelle innerhalb der Wasserstraße. Ihm ist durch Hinweise, verkehrslenkende und / oder bauliche Maßnahmen zu begegnen.“* (WSV, 2010 [84]).

Das Pilotprojekt ARGO (elektronisches Fahrrinnen-Informationssystem) begann bereits 1997 und wurde federführend von der Projektgruppe Telematik bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest durchgeführt (WSV, 2003 [82]). Ziele des Projekts waren u. a. die Identifikation von Engpassstellen bei Niedrig- und Mittelwasser sowie die Entwicklung eines Systems, das die elektronische Flusskarte, das Radarbild und die Satellitenortung vereint und dabei aktuell verfügbare Wassertiefen für die Binnenschifffahrt in abladebestimmenden Engstellen bereitstellt.

Die Fahrrinnsituation an dem Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt zwischen Mainz (Rhein-km 497) und St. Goar (Rhein-km 557) war Auslöser für das Projekt. An diesem Streckenabschnitt wird eine Fahrrinntiefe, bezogen auf den Gleichwertigen Wasserstand (GIW), von 1,90 m vorgehalten. Im angrenzenden Abschnitt ober- bzw. unterhalb dieser Strecke steht eine Fahrrinntiefe von 2,10 m zur Verfügung. Genauere Informationen über die Lage der Fahrrinne und die Verteilung der Tiefen würden den Schiffsführern eine bestmögliche Ausnutzung aktuell verfügbarer Wassertiefen mit tiefer abgeladenen Schiffen ermöglichen, welches bislang nur ortskundigen Schiffsführern vorbehalten war.

Für die Strecke zwischen Budenheim (Rhein-km 508,5) und Kaub (Rhein-km 547,1) wurden wasser-spiegelbezogene Tiefeninformationen ausgewählten Schiffsführern für einen Probetrieb bereitgestellt. Die hinterlegten Wasserspiegellagen stammen aus einem eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell. Mit dem Strömungsmodell wurde im Vorfeld ein Wasser-spiegellagenfächer über das gesamte Abflussspektrum berechnet und über Pegelbezug mit den ausgewerteten Flächenpeilungen verknüpft. Die Schiffsführer konnten bei ihren Fahrten den aktuellen Pegelwert in dem System einstellen, um die verfügbaren Tiefeninformationen darzustellen.

Die Engpassstellen wurden bei dem am Richtpegel eingestellten Wasserstand und dem gewählten Tiefenanspruch inklusive 10 cm Sicherheitszugabe, getrennt für Niedrig- (bei GIW) und Mittelwasser (MW), bestimmt. In Tabelle 3-2 sind die identifizierten Engpassstellen im Niedrig- und Mittelwasserbereich und deren Ortsbezeichnung aufgelistet. Alle deutlichen Einschränkungen in der Fahrrinnenbreite (siehe Abbildung 3-10) werden als Engpassstellen definiert. Die Farbabstufung gibt den eingestellten Tiefenanspruch wieder. Eine automatisierte Auswertung wurde nicht ermöglicht.

### 3 Verfahren, Dienste und Untersuchungen zum Thema Befahrbarkeit

Tabelle 3-2: Identifizierte Engpassstellen im Niedrig- (GIW) und Mittelwasserbereich (MW) (WSV, 2003 [82])

Nr.	Engpassstelle bei GIW	Engpassstelle bei MW	Uferseite der Einschränkung	Ortsbezeichnung
I	515,2 – 515,6	514,4 – 515,9	rechts	Kleine Giess (Hattenheim)
II	517,5 – 517,9	516,8 – 517,9	rechts/durchgehend	Oestrich
III	518,4 – 519,2	518,1 – 519,2	rechts	Ingelheim-Nord
IV	522,5 – 523,6	522,5 – 523,6	rechts	Geisenheim
V	524,4 – 525,8	524,4 – 525,8	rechts	Kemptener Fahrwasser
VI	531,9 – 532,8	-	rechts	Assmannshausen
VII	539,6 – 539,9	539,6 – 539,9	rechts	Lorch
VIII	542,9 – 543,9	543,1 – 543,8	rechts	Bacharach

Von den Fahrten der Teilnehmer am ARGO-Probebetrieb wurden elektronische Aufzeichnungen durchgeführt und die aufgezeichneten Bahnkurven auf Auffälligkeiten überprüft und ausgewertet. Betrachtet man die überlagerten Bahnkurven in den identifizierten Engpassstellen getrennt für die Berg- und Talfahrt, so ist eine Bündelung der Bahnkurven in diesen Bereichen erkennbar (siehe Abbildung 3-11).

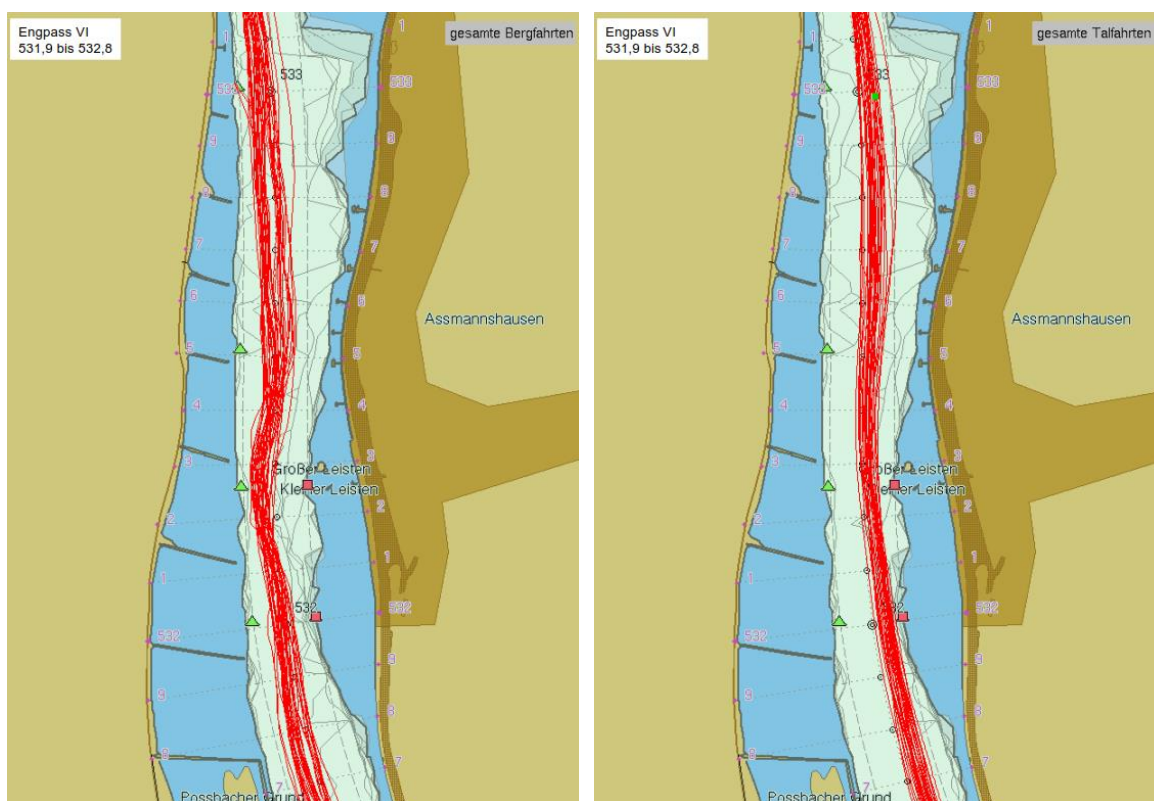


Abbildung 3-11: Bündelung der aufgezeichneten Bahnkurven zu Berg (links) und Tal (rechts) im Bereich der Gebirgsstrecke bei Assmannshausen in der Engpassstelle VI

Von den Probebetriebsteilnehmern wurde eine Aktualisierung der Tiefeninformationen hinsichtlich Verlässlichkeit als entscheidend angesehen. Orts- und ereignisabhängig kann eine häufigere Aktualisierung als die mindestens einmal jährliche Unterhaltungspeilung erforderlich sein. Trotz der positiven Resonanz der Schiffsführer über den Nutzen der bereitgestellten zusätzlichen

Informationen zu der Fahrrinne, sind in den aktuell verfügbaren Navigationskarten keine Tiefeninformationen mehr enthalten. Die Tiefeninformationen wurden nicht wie geplant aktualisiert, sodass die zunehmend veralteten Informationen aus den Karten wieder entnommen wurden und lediglich die Solltiefe der Fahrrinne, bezogen auf den gleichwertigen Wasserstand (GIW), als Information zurückblieb.

### 3.3 Fahrdynamische Verfahren im Binnenbereich

Im Binnenbereich haben die fahrdynamischen Verfahren in den vergangenen Jahrzehnten eine Entwicklung durchlaufen, von einfachen Verfahren zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs ohne bzw. eingeschränkte Berücksichtigung der Strömungsinformationen und der Fahrdynamik des Schiffes, bis hin zu komplexen, aufwändigen Verfahren unter Berücksichtigung hochauflöser Strömungsinformationen, der Schiffssteuerung, menschliches Verhalten und der Schiffsbewegung sowie der Berücksichtigung von Interaktionen (Schiff / Schiff bzw. Schiff / Wasserstraße) und Umwelteinflüssen (Sicht- und Wetterbedingungen).

Bei der Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* ist für die Berücksichtigung des fließenden Verkehrs eine Abschätzung der Fahrspurbreite eines Schiffes und zeitnahe Bereitstellung erforderlich. Daher wurden im Rahmen der Arbeit unterschiedlich komplexe fahrdynamische Verfahren zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs betrachtet. Aufgrund des Umfangs bezieht sich die Beschreibung der Verfahren auf die in der WSV bzw. in der BAW etablierten fahrdynamischen Verfahren. Ergänzende Informationen können z. B. dem Forschungsbericht zur *Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen* (BAW, 2014 [8]) oder den jeweiligen Handbüchern zu den Verfahren entnommen werden.

#### 3.3.1 Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs in Kanälen bzw. schwach fließenden Gewässern mit dem Verfahren *Trasse*

Das Verfahren *Trasse* wurde 1995 in der BAW entwickelt und zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs in Kanälen bzw. in schwach fließenden Gewässern mit kleinen Fließgeschwindigkeiten bis etwa 0,5 m/s eingesetzt. Es basiert auf den in Kapitel 2.1.2.2 erläuterten Gleichungen [2-6] ff. von *Graewe* und deren Vereinfachung durch Einführung eines dimensionslosen  $C_f$ -Wertes. Der  $C_f$ -Wert wurde für verschiedene Bemessungsschiffe mit einer Abladetiefe von 2,8 m aus Versuchsreihen empirisch ermittelt und ist über den Kurvenradius nahezu konstant (siehe Abbildung 2-7 in Kapitel 2.1.2.2). Die Position des taktischen Drehpunktes ist durch Festlegung des Bemessungsschiffes, des Beladungszustandes und des  $C_f$ -Wertes (siehe Abbildung 2-8 in Kapitel 2.1.2.2) fix. Es handelt sich um konservative Werte, da nicht alle Bemessungsschiffe optimale Manövriereigenschaften aufweisen bzw. gleich abgeladen sind.

Für die Anwendung des Verfahrens *Trasse* müssen die Kursachse und der  $C_f$ -Wert bekannt sein. Die Achse wird manuell konstruiert und besteht aus Geraden und Kreisbögen, die tangential ineinander übergehen. Entlang der konstruierten Kursachse positioniert das Verfahren *Trasse* an die Achspunkte

den Umriss des Bemessungsschiffes im taktischen Drehpunkt parallel zur Tangente der Kursachse (siehe Abbildung 3-12). Durch Einzelpositionierung der Umrisse entlang der Kursachse erhält man die Schleppkurve, welche der Umhüllenden aller Umrisse entspricht. Aus der Schleppkurve kann die Fahrspurbreite und der Verkehrsflächenbedarf ermittelt werden.

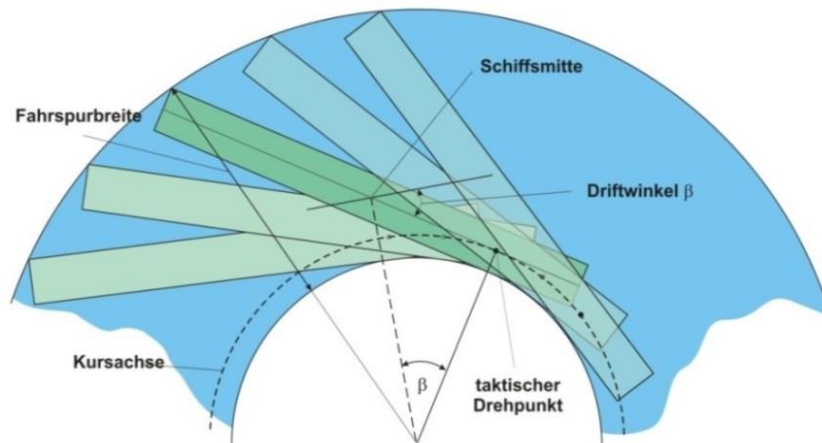


Abbildung 3-12: Taktischer Drehpunkt und Schleppkurve durch Einzelpositionierung (Heinzelmann et al., 2009 [46])

Die Fahrinnenbreite setzt sich aus den Fahrspurbreiten der Bemessungsschiffe zuzüglich der Sicherheitsabstände zwischen Berg- und Talfahrt sowie Sicherheitsabständen zum Ufer zusammen. Erkennt man aus den erzeugten Schleppkurven bzw. Fahrinnenbreiten, dass die gestellten Anforderungen, wie z. B. ausreichende Sicherheitsabstände zum Ufer nicht eingehalten werden, dann müssen - sofern überhaupt möglich - die Kursachsen solange iterativ abgeändert werden, bis die Anforderungen erfüllt sind.

Das Verfahren *Trasse* kann z. B. bei der Planung einer künstlichen Wasserstraße oder in schwach fließenden Gewässern zur Festlegung der Fahrinnengeometrie, einer Baustellenumfahrung oder von Schleusenvorhöfen angewendet werden. Bei dem Verfahren werden keine Einflüsse aus Querströmungen, Wind, Sichtbedingungen, Erfahrungen des Schiffsführers, Schiffsausrüstung etc. berücksichtigt. Lediglich pauschal durch zusätzliche Breitenzuschläge oder Wahl des  $C_f$ -Wertes kann die Sicherheit erhöht werden. Eine ausreichende Tiefe unter der Schleppkurve wird vorausgesetzt und nicht geprüft. Das Verfahren *Trasse* ist eine Softwareapplikation in *MicroStation* und ist im *Handbuch von Höfer, Bechtel, 2004 [50]*, in den *Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschiff-fahrtskanälen des BMVBS, 2011 [11]* sowie in dem Forschungsbericht der BAW zur *Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen, 2014 [8]* erläutert.

#### **3.3.2 Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs in fließenden Gewässern und Kursachsengenerierung mit dem Verfahren *Petra1D***

Die Fahrspurbreiten in Fließgewässern unterscheiden sich zu denen in Stillgewässern bzw. Kanälen (Kapitel 2.1.2). Daher wurde im Jahr 2000 das Verfahren *Petra1D (Pegelabhängige Trassierung)* zur



Trassierung in fließenden Gewässern entwickelt. Das Verfahren eignet sich zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs (Kapitel 3.3.2.1) und als Kursachsengenerator (Kapitel 3.3.2.2).

#### 3.3.2.1 Verkehrsflächenbedarfsermittlung

Das Verfahren *Petra1D* basiert auf einem Kräftegleichgewicht in der stationären Kreisfahrt (*Heinzelmann et al., 2009 [47]*). Aus dem Kräftegleichgewicht wird für jede Schiffsposition entlang der vorgegebenen Kursachse in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit des Gewässers, der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes und der Form des Unterwasserschiffes, die Position des taktischen Drehpunktes ermittelt. Die Berechnung der hydrodynamischen Kräfte basiert dabei auf einem modularen mathematischen Modell. Die hydrodynamischen Massen werden auf Basis der Streifentheorie bestimmt. Die Kräfte infolge Schräganströmung basieren auf einem Querwiderstandsmodell (z. B. in *Sharma, 1982 [75]*).

Das Verfahren berücksichtigt die Fließgeschwindigkeit des Gewässers, indem die Strömung auf die Hauptströmungsrichtung (eindimensionale Strömungscharakteristik) reduziert wird. Die Strömungsinformationen werden an den Querprofilen bereitgestellt. Sowohl die Abschnitte zwischen den Profilen als auch Querströmungseinflüsse werden in dem eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Verfahren nicht beachtet. Mit Kenntnis des Kurvenradius und des  $C_f$ -Wertes kann die Fahrspurbreite gemäß den Gleichungen [2-8] und [2-10] nach dem Ansatz von *Graewe* in Kapitel 2.1.2.2 berechnet werden. In dem Verfahren selbst wird nicht geprüft, ob die ermittelte Kursachse real gefahren werden kann. Dies geschieht im Nachgang z. B. durch Vergleich mit Schiffseinmessungen in der Natur oder durch ergänzende Untersuchungen z. B. mit einem Binnenschiffsführungssimulator (Kapitel 3.3.3).

#### 3.3.2.2 Kursachsengenerator

Das Verfahren *Petra1D* wurde dahingehend entwickelt, dass Kursachsen unter Beachtung der durch das Fließgewässer vorgegebenen örtlichen Gegebenheiten, automatisch generiert werden können. Es berücksichtigt querprofilbezogene Informationen über die Fahrrinne, das Schiff (Abmessungen, Tiefgang, taktischer Drehpunkt) und hydraulische Kenngrößen aus dem 1D-HN-Modell des Fließgewässers (über das Querprofil streifengemittelte Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten). Alle Eingangsparameter müssen über das Querprofil verteilt als Streifeninformationen vorliegen. Die einzelnen Parameter werden an jedem Profil in Potentiale mit einer Skala von 0 bis 100 normiert und unter Berücksichtigung von Wichtungsfaktoren aufsummiert (siehe Abbildung 3-13). Der Querprofilbereich bzw. die Bereiche mit der größten Potentialsumme gelten als optimal befahrbar. Eine flächige Visualisierung ist nicht möglich. Der von Profil zu Profil variierende Normierungswert (z. B. größte Fließgeschwindigkeit im Profil) schließt zudem eine Vergleichbarkeit von Profilen und somit eine objektive Beurteilung basierend auf hydraulischen Kenngrößen aus.

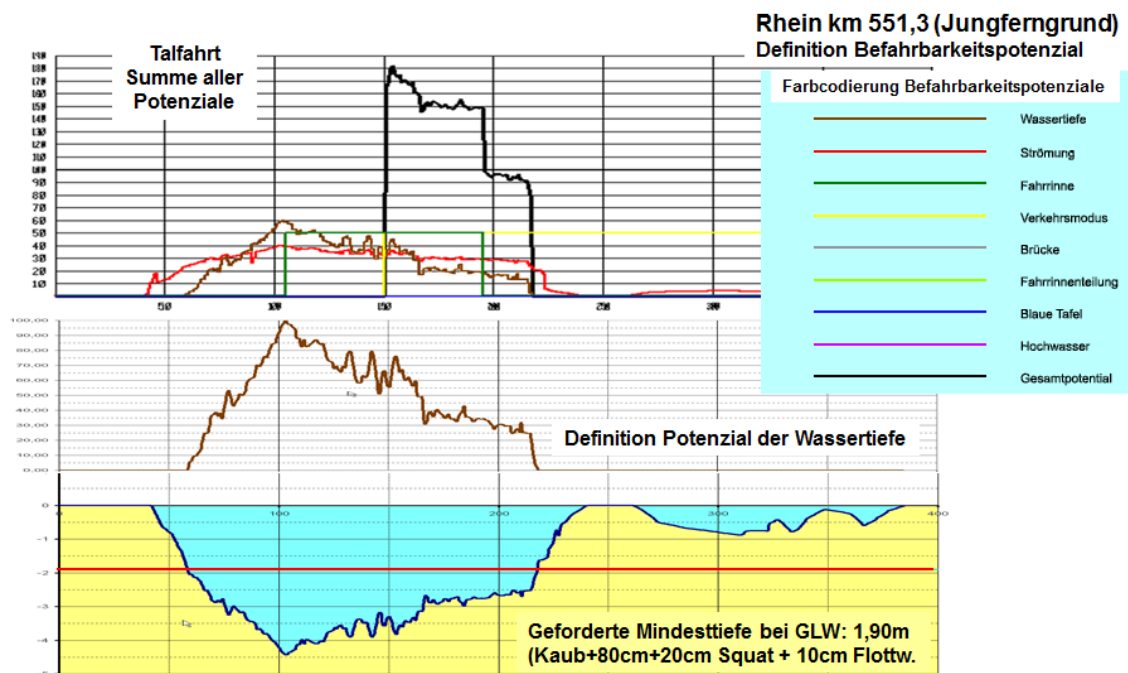


Abbildung 3-13: Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials am Profilquerschnitt bei Rhein-km 551,3 (BAW, 2014 [8])

Bei dem Verfahren muss die Kursachse so konstruiert werden, dass die Querprofilbereiche mit den größten Potentialsummen von der Kursachse durchlaufen werden. Die minimal erforderliche Torbreite hängt von den Abmessungen des Schiffes, der Lage des taktischen Drehpunktes und dem Radius der Kursachse ab. Anstatt des Radius der Kursachse wird vereinfacht der Radius der Fahrinne verwendet. Auf die Algorithmen zur Berechnung und Optimierung der Kursachsen wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Diese sind in dem Handbuch zu dem Verfahren *Petra1D* ausführlich erläutert (Höfer, Bechtel, 2005 [51]). Nachdem die Kursachsen bekannt sind, fehlt die Festlegung des taktischen Drehpunktes. Für die Position des taktischen Drehpunktes wird die fahrdynamische Konstante  $C_f$  eingesetzt und z. B. nach Abbildung 2-11 in Kapitel 2.1.2.3 bestimmt. Wie bei dem Verfahren *Trasse* wird der taktische Drehpunkt des Bemessungsschiffes tangential entlang der Kursachse (siehe Abbildung 3-12) geführt. Eine abschließende Überprüfung nach der Positionierung der Schiffssymbole, ob sich die Schiffseckpunkte tatsächlich innerhalb der ermittelten größten Potentialsummen an den Querprofilen befinden, wird nicht durchgeführt. Solange der  $C_f$ -Wert kleiner 1 ist (überwiegend bei der Bergfahrt), also der taktische Drehpunkt innerhalb des Schiffes liegt, ist das nicht so schwerwiegend. Problematisch wird es, wenn der  $C_f$ -Wert größer 1 ist (überwiegend bei der Talfahrt) und der taktische Drehpunkt außerhalb des Schiffes vor dem Bug liegt. Dann müsste das Verfahren eine weitere Iteration durchlaufen mit einer Überprüfung der Kursachse bzw. des bestmöglichen Potentials. Das Verfahren *Petra1D* wird jedoch nicht mehr weiterentwickelt (BAW, 2014 [8]). Das Verfahren *Petra1D* ist im Handbuch von Höfer, Bechtel, 2005 [51] sowie in dem Forschungsbericht der BAW zur *Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen*, 2014 [8] erläutert.

### 3.3.3 Binnenschiffsführungssimulator

Im Rahmen der Arbeit ist eine Abschätzung der Fahrspurbreite eines Schiffes und zeitnahe Bereitstellung erforderlich, um das Bewertungsverfahren *RiNA* für den fließenden Verkehr zu erweitern. Daher werden im Folgenden der Aufbau, die Vorbereitung und Funktionsweise des Binnenschiffsführungssimulators beschrieben, um die Möglichkeiten in der Anwendung, die Modellgebietsgröße aber auch den Modellierungsaufwand darzulegen.

Schiffsführungssimulatoren können in der Aus- / Weiterbildung, in der Infrastrukturplanung, als Instrument der Binnenschiffsentwicklung oder in der Unfallermittlung / -prävention verwendet werden. Diese verschiedenen Anwendungsfelder sind in der Schrift des *Vereins für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e. V.*, 2014 [80] beschrieben. Der Schiffsführungssimulator ist ursprünglich für die Ausbildung des nautischen Personals auf Seeschiffen ausgelegt worden, wurde aber seitens des Herstellers für die Belange der Binnenschifffahrt angepasst und seit einigen Jahren erstmals für fahrdynamische Untersuchungen im Binnenbereich eingesetzt.

Der Binnenschiffsführungssimulator verfügt über eine Binnenschiffsbrücke (Hauptsteuerstand, siehe Abbildung 3-14) mit originalen Bedienelementen für Maschine, Ruder und Querstrahler. Alle notwendigen Anzeigeelemente erscheinen generisch auf Bildschirmen und gewährleisten so ein Höchstmaß an Flexibilität, da die Anzeigeelemente an die verschiedenen Schiffstypen bzw. Untersuchungsziele angepasst werden können. Der Simulator ist mit einem mehrkanaligen Sichtsystem sowie mit Radarequipment ausgestattet, sodass in einer Manöverfahrt wahlweise nach Sicht oder mittels Radarnavigation gesteuert werden kann. Ein zweiter Steuerstand ermöglicht die Realisierung einer Begegnung von zwei selbst gesteuerten Schiffen. Von einem Instruktorarbeitsplatz aus werden die Simulationen zusammengestellt und gesteuert.

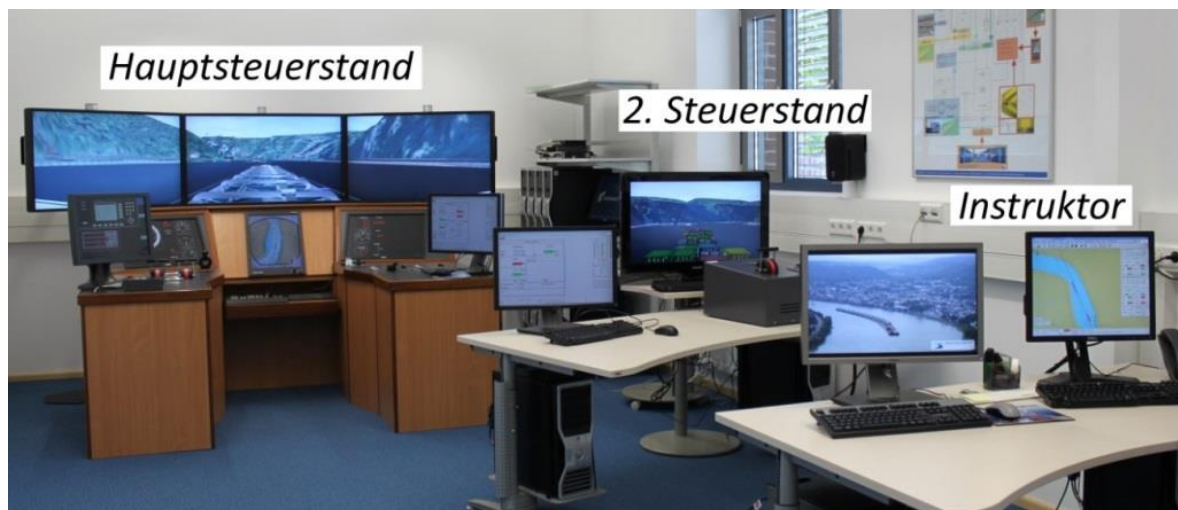


Abbildung 3-14: Binnenschiffsführungssimulator ANS5000 der BAW Karlsruhe

Für die Durchführung von Untersuchungen mit einem Binnenschiffsführungssimulator muss dieser entsprechend vorbereitet werden. Hierzu gehören u. a. die Erstellung eines Fahrtreviers, die Berechnung maßgebender Abflussszenarien mit einem hydrodynamisch-numerischen Strömungs-

modell sowie die Erstellung bzw. Anpassung eines fahrdynamischen Schiffsmodells (siehe Abbildung 3-15).



Abbildung 3-15: Vorbereitung des Binnenschiffsführungssimulators (Harlacher, 2014 [41])

#### 3.3.3.1 Erstellung eines Fahrtreviers

Für die Durchführung fahrdynamischer Untersuchungen muss das Fahrtrevier modelliert werden. Soll das Schiff nach Sicht und Radar gefahren werden, so muss ein entsprechendes Sichtmodell angefertigt werden. Die Datenbasis für ein derartiges Modell bilden die elektronischen Navigationskarten im Inland (Inland ENC).

Aus den Informationen der elektronischen Navigationskarten (u. a. Uferlinien, Bauwerke im und am Gewässer) wird unter Nutzung von Befliegungsdaten der NASA das Basisgelände als Sichtmodell erstellt. Derzeit werden Modellgebiete von etwa 10 km Größe modelliert. Aus dem Basisgelände wird während der Simulation das Radarbild generiert. Soll eine Fahrt nach Sicht simuliert werden, so muss das Basismodell je nach Anforderung verfeinert und angepasst werden.

Hierfür werden hoch aufgelöste Gelände- und Sohlinformationen aus zweidimensionalen Abfluss- bzw. digitalen Geländemodellen verwendet. Wasserbauwerke (Brücken, Schleusen etc.) müssen in Einzelanfertigung als dreidimensionale Objekte erstellt werden, damit bei der Simulation Kollisionen bestimmt werden können. Im Fahrtrevier werden Gebäude, Bebauung und Vegetation zur Berücksichtigung der Windabschattung bzw. zur Orientierung des Schiffsführers bei der Navigation ergänzt. Tonnen, Baken, Signalstellen, Licht- und Tafelzeichen u. a. werden als dreidimensionale Objekte modelliert. Die Landschaft wird mit digitalen Orthophotos überzogen und die Bebauung bzw. Objekte werden mit Texturen belegt (siehe Abbildung 3-16).



Abbildung 3-16: Erstellung eines verfeinerten Geländemodells mit generischen Texturen für eine Simulationsfahrt nach Sicht bzw. Radar (hier im Bereich Oberwesel) (Harlacher et al., 2015 [42])

#### 3.3.3.2 Strömungsinformationen aus einem Abflussmodell

Für die eigentliche Simulation und zum Abgreifen der Strömungsinformationen nutzt der Simulator die Inland ENCs (Kapitel 3.2.2) ebenfalls als Datenbasis. Allerdings sind für die Untersuchungen detailliertere Tiefen- sowie Fließgeschwindigkeitsinformationen erforderlich, als diejenigen, die ggf. in den offiziell verfügbaren elektronischen Navigationskarten zum Teil enthalten sind. Um die Strömungsinformationen für den Simulator nutzbar zu machen, müssen diese in einem definierten Format vorliegen.

Hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle (Kapitel 2.2) liefern für unterschiedliche Abfluss-szenarien hoch aufgelöste Wasserstands- und Strömungsinformationen. Abbildung 3-17 zeigt exemplarisch für einen Rheinabschnitt die berechneten tiefengemittelten zweidimensionalen Strömungsfelder aus einem HN-Modell. Mit der Software *Feature Manipulation Engine (FME)* können sowohl die Unterwassergeometrie als auch die Strömungsvektoren in den Inland ENC Standard überführt werden. Die Abbildung 3-18 stellt exemplarisch die Fließgeschwindigkeitsvektoren und die Fließtiefen bzw. Sohldaten aus dem 2D-HN-Modell dar. Der Binnenschiffsführungssimulator ist somit in der Lage, Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Wasserspiegellagen aus den Strömungsmodellen zu verarbeiten.



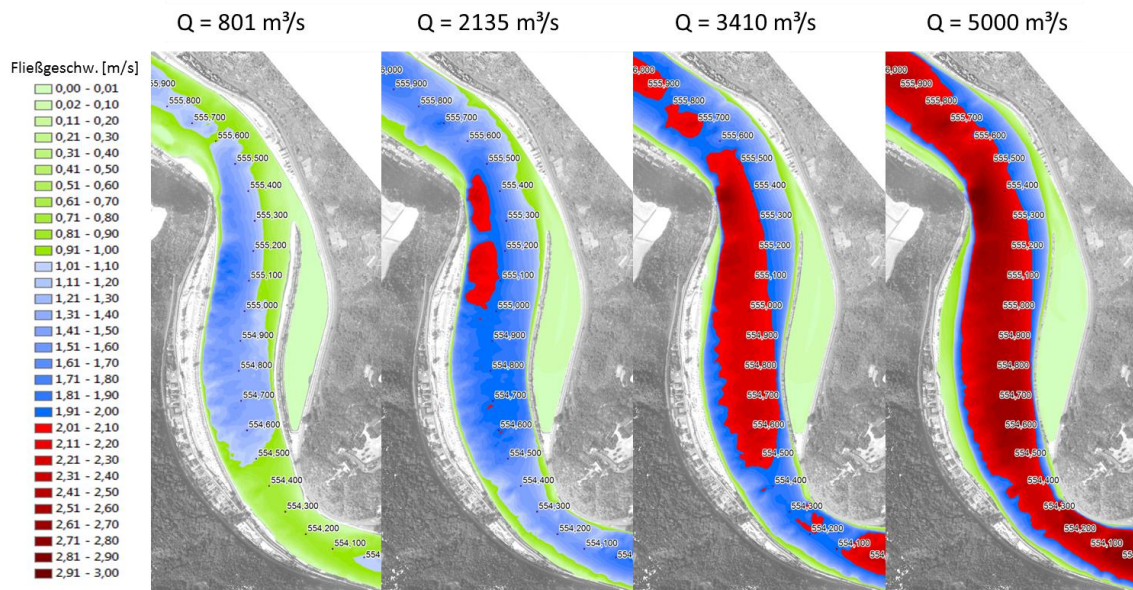


Abbildung 3-17: Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen (Niedrig-, Mittel-, Hochwasser etwa bei Hochwassermarke I und II) aus einem tiefgemittelten 2D-HN-Modell (Harlacher, 2014 [41])

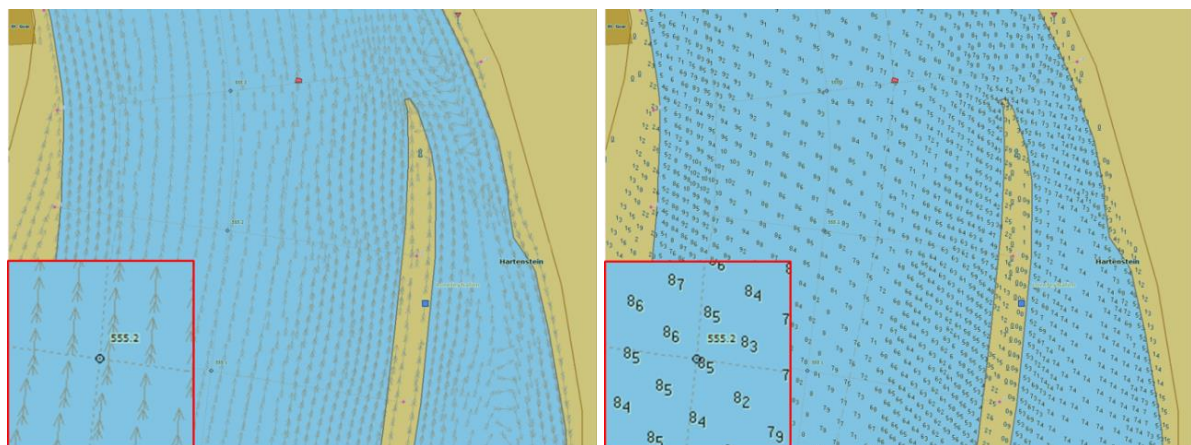


Abbildung 3-18: Integration der Sohldaten und tiefgemittelten Strömungsdaten in eine Inland ENC (Dettmann, Harlacher, 2013 [26])

Das Fahrtrevier beinhaltet die Abflusssituation, die Morphologie des Flussbettes, die Sichtbedingungen und die meteorologischen Randbedingungen. Da im Verlauf der Simulation das Schiff sowohl nach Sicht als auch nach Radar durch einen Schiffsführer gesteuert werden soll, wird bei der Erstellung des Sichtmodells Wert auf Vergleichbarkeit mit der Realität gelegt. Hier sollte der Grundsatz gelten, nicht so genau wie möglich zu modellieren, sondern so genau wie notwendig. Die Modellierung sollte in einem vertretbaren und durchführbaren Aufwand stehen.

#### 3.3.3.3 Modellierung eines Schiffes

Ein Schiffsmodell besteht aus zwei Komponenten, dem Sichtmodell und dem fahrdynamischen Modell. Das Sichtmodell wird als dreidimensionales Objekt auf der Grundlage von Bauplänen,

Abmessungen und Fotos erstellt (siehe Abbildung 3-19). Das integrierte fahrdynamische Modell basiert auf den Bewegungsgleichungen für ein Schiff als Starrkörper (Kapitel 2.1.1; *Abkowitz, 1964 [1]*; *Norrbin, 1971 [64]*). Die Bestimmung des Driftwinkels erfolgt nicht - wie in den zuvor beschriebenen Verfahren zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs - über die Ermittlung der Position des taktischen Drehpunkts, sondern durch Lösung der Bewegungsgleichungen. Das Modell berücksichtigt die äußeren Kräfte in der modularen Formulierungsweise (*RDE, 2008 [71]*). Eine Aufteilung in Systemelemente (z. B. Rumpf, Propeller und Ruder) ermöglicht einen Austausch eines einzelnen Modells oder die Erweiterbarkeit durch zusätzliche Systemelemente (z. B. Querstrahler) (*Sharma, 1982 [75]*). Die unbekannten Parameter der einzelnen Kraftmodelle werden separat bestimmt und können Interaktionen zwischen den verschiedenen Kraftwirkungen somit nicht per se abbilden. Zahlreiche Parameter sind so zu identifizieren, dass die Fahreigenschaften eines Binnenschiffes und somit alle Schiffsbewegungen realitätsnah abgebildet werden. Bei den wesentlichen Identifikationsmethoden für die Parameter unterscheidet man zwischen gefesselten Modellversuchen (*Wolff, 1981 [81]*), freifahrenden Versuchen (Modell oder Großausführung; *Oltmann, 1978 [67]*) oder virtuelle Modellversuche durch CFD-Methoden (Computational Fluid Dynamics) (*Cura-Hochbaum, 2006 [24]*). Der Einfluss von Maßstabseffekten bei der Manövriervorhersage wurde von *Lantermann et al., 2015 [55]* untersucht.



Abbildung 3-19: Modellierung eines Schiffsmodells (hier: TMS Waldhof)

Bei der Modellierung eines Schiffes gibt es die Möglichkeiten, ein Modell mit 3 oder 6 Freiheitsgraden (DoF - Degrees of Freedom) zu wählen (siehe Abbildung 2-1 in Kapitel 2.1.1.1). Ein 3 DoF Modell umfasst die Bewegungen in der Ebene, also Bewegung voraus, seitlich und die Drehung um die Hochachse  $z$ . Ein 6 DoF Modell umfasst zusätzlich die Bewegung entlang der Hochachse  $z$  sowie die Drehungen um die Achsen  $x$  und  $y$ . Für die Ermittlung der Fahreigenschaften eines Binnenschiffes (Beschleunigungsverhalten, Schiffsgeschwindigkeit, Bestimmung der Abhängigkeit von der Maschinendrehzahl, Bremsweg, Schiffswiderstand, Kursstabilität, Drehfähigkeit, Wirksamkeit des Querstrahlruders, Fahrspurbreiten u. a.) werden z. B. in Großausführungsmessungen unterschiedliche Schiffsmanöver (Drehkreis, Zick-Zack u. a.) durchgeführt. Alle Schiffsbewegungen werden mittels GPS aufgenommen. Parallel dazu werden alle notwendige Zustandsgrößen und Maschinenparameter (Kommandiert und Istwert von z. B. Maschinendrehzahl, Ruderwinkel, Bugstrahlrudereinsatz u. a.) aufgezeichnet und die Kommandos aus dem Steuerhaus fortlaufend zeitbezogen erfasst. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten werden die Parameter des Simulatorschiffes derart identifiziert, dass bei allen Manövern die virtuellen Maschinen des Schiffes mit gleicher Verzögerung

auf die Kommandos des Simulators reagieren und das Schiff nahezu die gleichen Bewegungen wie das Originalschiff vollführt. Nach der Identifikation der Parameter wird die Validierung der Fahreigenschaften des Schiffes durch den Schiffsführer durchgeführt. Der Schiffsführer fährt vorgegebene und selbst gewählte Manöver am Binnenschiffsführungssimulator nach und bewertet das Fahrverhalten auf Basis seiner nautischen Erfahrungen. Nach der erfolgreichen Entwicklung eines Parametersatzes für ein Binnenschiffsmodell wird ein Validierungsdokument erstellt (BAW, 2012 [5]).

#### 3.3.3.4 Durchführung von Simulationsfahrten

Nach der Erstellung des Fahrtreviers, der Integration der Strömungsdaten und der Modellierung eines Schiffes, können die Untersuchungsszenarien zusammengestellt werden. Schiffsführer mit Streckenkenntnissen des Untersuchungsgebietes werden eingeladen und führen die Simulationsfahrten durch (siehe Abbildung 3-20). Alternativ können unter Vorgabe einer Leitlinie die Simulationsfahrten mit einem automatischen Bahnführungssystem durchgeführt werden (Lutz et al., 2014 [58]). Das einfache Bahnführungssystem verwendet als Stellgröße den Ruderwinkel, bei erschweren Manövern wird das Bugstrahlruder als zusätzliche Stellgröße berücksichtigt.



Abbildung 3-20: Durchführung von Simulationsfahrten an einem Binnenschiffsführungssimulator

Bei der Durchführung von Simulationsfahrten unterscheidet man bei den eingesetzten Schiffen zwischen sogenannten Eigenschiffen (own ships) und Fremdschiffen (traffic ships). Eigenschiffe sind Modelle von Schiffen, welche in dem Bewegungsmodell alle 6 Freiheitsgrade aufweisen und sowohl mit der Umgebung als auch mit anderen Schiffen interagieren können. Fremdschiffe haben einen vereinfachten Parametersatz, die hauptsächlich Abmessungen, Antriebsleistung und Masse des Schiffes beschreiben. Sie eignen sich dafür, Schiffe auf einem festen Kurs nach vorgegebenen Geschwindigkeiten fahren zu lassen, ohne dass sich die Schiffe durch die äußeren Randbedingungen wie Wind, Strömung oder Wechselwirkung Schiff / Schiff oder Schiff / Wasserstraße beeinflussen lassen. Sie selbst erzeugen aber Wechselwirkungen mit Eigenschiffen.



Neben auditiven Einflüssen wie Maschinen- und Funkgeräusche, können auch die Wetter- und Sichtbedingungen (Tag / Nacht, Nebel, Regen, Schnee, Wind etc.) nach Vorgabe und Bemessungssituation eingestellt werden. Auch das Radarbild verschlechtert sich durch Einstellen von z. B. starkem Regenschauer oder Hagel.

Die Simulationsfahrten werden fortlaufend zeitbezogen aufgezeichnet. Im Nachgang können die zahlreichen Parameter, wie z. B. Fahrgeschwindigkeit, Ruderwinkel, Position, Maschinenleistung, Fahrspurbreiten, Abstände etc., ausgewertet und gegenübergestellt werden. Im Ergebnis erhält man für das untersuchte Abflussszenario eine Grundlage zur Beurteilung der Simulationsfahrt durch den gewählten Schiffstyp mit Tiefgang. Allerdings bezieht sich die Befahrbarkeit einer Simulationsfahrt nicht auf einen Streckenabschnitt, sondern lediglich auf den gefahrenen Kurs. Für die Untersuchung eines Streckenabschnittes wird ein komplettes Versuchsprogramm mit mehreren Simulationsfahrten bei unterschiedlichen Randbedingungen (u. a. Schiffstyp, Abfluss, Schiffsführer, Wetterbedingungen etc.) durchgeführt, welches schnell sehr aufwändig und kostenintensiv werden kann.



## 4 Verfahrensentwicklung zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit

Im vorigen Kapitel wurden unterschiedliche Verfahren, Dienste und Untersuchungen zum Thema Befahrbarkeit vorgestellt. Es konnte aufgezeigt werden, dass sich die Befahrbarkeit einer Binnenwasserstraße je nach Fragestellung und Zielsetzung auf verschiedene Art und Weise ermitteln lässt. Die eingesetzten Verfahren und Methoden unterscheiden sich u. a. hinsichtlich Eingangsdaten, Gebietsgröße, Komplexität und Aufwand deutlich. Bestehende Verfahren sind für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit nicht geeignet.

Befahrbarkeitsanalysen sind ein wichtiges Analyse- und Planungsinstrument um z. B. die Nutzung einer Wasserstraße für größere Fahrzeuge zuzulassen, vorhandene Engstellen zu identifizieren oder die Fahrrinnenstrassierung zu optimieren. Für einen sicheren, leichten und gleichzeitig wirtschaftlichen Betrieb einer Wasserstraße müssen neben einer geeigneten Trassierung der Fahrrinne vor allem eine ausreichende Breite und Tiefe vorgehalten werden. Hinzu kommt, dass natürliche Fließgewässer in der Vergangenheit durch anthropogene Eingriffe wie Flussbegradigungen, Bau von Buhnen, Stauanlagen etc. stark verändert wurden, um u. a. den steigenden Anforderungen der Schifffahrt an eine Wasserstraße gerecht zu werden. Aber auch seitens der Schifffahrt wird fortwährend versucht, z. B. durch größere Schiffe, leistungsfähigere Manövrierorgane und Einsatz unterstützender Informationssysteme, die Nutzung der Wasserstraßen zu optimieren. Durch die sich stetig verändernden Randbedingungen und Anforderungen ist eine Ermittlung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen eine immer wiederkehrende Aufgabe und Herausforderung. Ein Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen wurde bislang nicht umgesetzt und dessen Entwicklung wurde im Rahmen der Dissertation angestrebt und wird im Folgenden erläutert.

### 4.1 Ziele und Beschreibung des Verfahrens

Das zentrale Ziel der Dissertation ist es aufzuzeigen, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen und bestehender Verfahren, die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen visualisiert und bewertet werden kann. Neben der Geometrie eines Fließgewässers, den Ergebnissen hydrodynamisch-numerischer Flussgebietsmodelle und den Kenngrößen eines Binnenschiffes bzw. den Fahrrinneneigenschaften, werden Informationen aus der Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC) sowie ergänzende Verkehrsregeln in dem Bewertungsverfahren *RiNA* (*River Navigation Assessment*) berücksichtigt (siehe Abbildung 4-1).

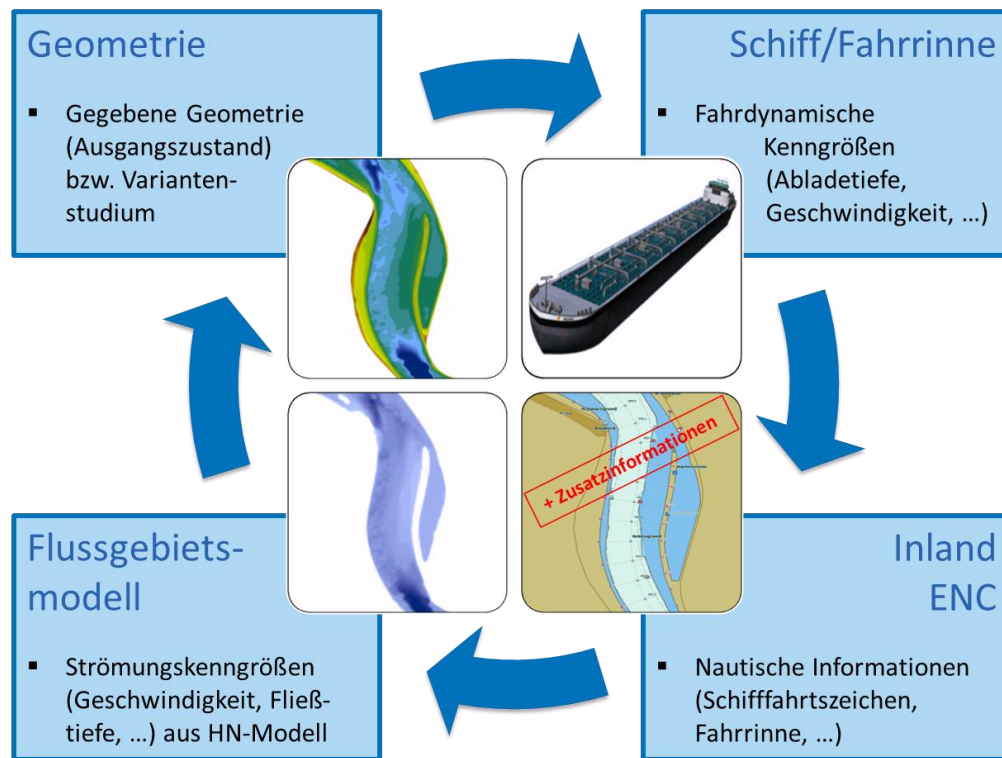


Abbildung 4-1: Bestandteile des Verfahrens *RiNA* zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen

Im Rahmen der Arbeit wird die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen aufgezeigt, prototypisch umgesetzt und in Fallstudien am Rhein angewendet. Die Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines solchen Verfahrens liegen in der Kombination unterschiedlicher Eingangsdaten aus verschiedenen Fachbereichen, in der flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit sowie in der Aufbereitung einer geeigneten Basis für eine objektive Beurteilung und Bewertung. Eine detaillierte Kenntnis über die Verteilung der Fließtiefen bzw. der Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen, ist eine wesentliche Voraussetzung des Bewertungsverfahrens *RiNA* für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit. Nautisch relevante Informationen aus den unterschiedlichen Fachbereichen werden interdisziplinär eingesetzt, aufbereitet und ergänzt, sodass diese durch geeignete Kombination einer Beurteilung und Bewertung hinsichtlich Befahrbarkeit unterzogen und visualisiert werden können. Darauf aufbauend können Gewässerabschnitte, Fahrrinnen und aufgezeichnete bzw. simulierte Schiffsfahrten objektiv analysiert und bewertet werden.

Die wesentlichen Bestandteile des Bewertungsverfahrens *RiNA* sind folgende (siehe Abbildung 4-1):

- Aus hydraulischer Sicht ist ein Gewässer geprägt von räumlich und zeitlich variablen Wasserspiegellagen, Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten, welche durch die hydrodynamisch-numerische Modellierung (Kapitel 2.2) beschrieben werden. Die Gewässergeometrie (Ausgangszustand bzw. Variantenstudium) geht zur Berechnung der Strömungskenngrößen in die Flussgebietsmodelle ein. Die berechneten Strömungskenngrößen haben Einfluss auf Abladetiefe, Fahrgeschwindigkeit und auf die Bahnkurve bzw. das Manövrieren eines Binnenschiffes.

- Aus fahrdynamischer Sicht haben das Fahrtrevier (Breite und Tiefe des Fahrwassers, Strömungscharakteristik, Fließgewässer etc.) und die Ausrüstung bzw. Eigenschaften des Schiffes (Motorisierung, Manöviereigenschaften, Abmessungen etc.) Einfluss auf die Schiffsbewegungen, die Kräfte am Schiff sowie auf die erforderliche Fahrspurbreite (Kapitel 2.1 und Kapitel 3.3). In dem Bewertungsverfahren *RiNA* können wesentliche Kenngrößen eines Binnenschiffes (Abmessungen, Tiefenanspruch, Geschwindigkeiten u. a.) individuell berücksichtigt oder allgemeine Angaben bzgl. der Fahrrinne, z. B. gemäß den technischen Vorgaben der Mindestgeschwindigkeit und Stoppeigenschaften aus der Binnenschiffahrtsuntersuchungsordnung (BinSchUO; WSV, 2014 [85]) sowie der Definition des Tiefenanspruches anhand der Tiefgangsangaben im Klassifizierungssystem der Binnenwasserstraßen (Kapitel 3.1 oder Anhang 1) bzw. der abflussabhängig definierten Fahrrinntiefen (BMVBS, 2014 [12]) getroffen werden.
- Unterstützt wird die Schifffahrt zunehmend durch sogenannte Binnenschiffahrtsinformationsdienste wie z. B. das Electronic Chart Display and Information System für den Binnenbereich (Inland ECDIS) und die Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC) (Kapitel 3.2). Basierend auf dem weltweiten Standard der Inland ENC werden ausgewählte Objekte (u. a. Fahrrinne, Liegestellen, Tonnen) aus den elektronischen Navigationskarten bei dem Bewertungsverfahren *RiNA* berücksichtigt.
- Zudem müssen auf den Wasserstraßen die angegebenen Verkehrsregeln (z. B. Schiffsabmessungen, Tauchtiefen, Fahrgeschwindigkeit, in Fahrtrichtung so weit wie möglich rechts halten) eingehalten werden. Ergänzend können wasserstandabhängige Sonderregelungen (z. B. für einen Talfahrer am Rhein möglichst in der Mitte zu fahren ab Erreichen der Hochwassermarken I in einem Richtpegelabschnitt) zur zusätzlichen Regelung des Verkehrs bzw. zum Schutz vor Wellenschlag existieren und ggf. berücksichtigt werden.

Nach der Überführung der unterschiedlich komplexen Eingangsdaten in ein gemeinsames Geoinformationssystem (GIS) werden aus nautisch relevanten Kenngrößen (z. B. Fließtiefen, Fließgeschwindigkeiten, Schiffsgeschwindigkeit, Tiefgang, Fahrrinnenanforderungen, Fahrregeln, Objekte aus der Inland ENC etc., Kapitel 4.3) sogenannte Einzelpotentiale (Kapitel 4.4.1) generiert. Hierfür mussten Verfahren entwickelt werden, um die interdisziplinären, vektorbasierten Geodaten in der Fläche mathematisch verarbeiten zu können. Für die Potentialentwicklung von Objekten aus der Inland ENC steht ein konstantes oder ein abgestuftes (distanzbasiertes) Verfahren mit inverser Reklassifizierung zur Wahl. Bei der Potentialentwicklung aus Strömungskenngrößen wurden je nach Parameter mehrstufige Verfahren zur Berücksichtigung der Anforderungen der Fahrrinne bzw. der Kenngrößen eines Binnenschiffes entwickelt. Das Bewertungsverfahren *RiNA* ist modular aufgebaut, sodass künftig weitere Einzelpotentiale je nach Fragestellung und Zielsetzung entwickelt und berücksichtigt werden können. Die Einzelpotentiale werden durch geeignete Kombinationen in Gesamtpotentiale (Kapitel 4.4.2) überführt. Die Gesamtpotentiale stellen eine flächige Verteilung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen unter Berücksichtigung von Strömungskenngrößen, Binnenschiffs- bzw. Fahrrinneninformationen und Objekten aus den elektronischen Navigationskarten dar.

Diese Befahrbarkeitspotentiale können für unterschiedliche Abflussszenarien (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser), Fahrrinnenanforderungen, Schiffstypen, Veränderung des Tiefgangs, Fahrtrichtung (Berg- bzw. Talfahrt) etc. aufbereitet und z. B. mit aufgezeichneten Naturmessungen von Schiffsfahrten validiert werden (Kapitel 4.5 und Kapitel 5).

Das Verfahren kann sowohl für klein- als auch großräumige Untersuchungen durch Definition der Zellauflösung eingesetzt werden und weist zudem von räumlicher Flexibilität durch Wahl des Zielkoordinatensystems. Ein weiterer Vorteil ist, dass die in dem Bewertungsverfahren *RiNA* entwickelten Analysewerkzeuge auch andere Anwendungsbereiche mit immer wiederkehrenden Fragestellungen eröffnet, so z. B. für die bereichsweise Ermittlung statistischer Kenngrößen für einzelne Fahrrinnenabschnitte, Schiffsphasen oder zur Bestimmung von Engstellen, Konturlinien, Längs- und Querschnitten. Die Befahrbarkeitspotentiale können den Schiffsführern bei ihrer Fahrt z. B. in der Inland ENC helfend bereitgestellt werden und stellen zudem eine Basis für die Entwicklung von sogenannten Fahrerassistenzsystemen (FAS) zur Unterstützung des Schiffsführers dar.

Die Umsetzung des Bewertungsverfahrens *RiNA* in einem Softwaresystem (Kapitel 4.6) wurde zunächst für den ungestörten Verkehr entwickelt. Durch zahlreiche Auswertungen aufgezeichneter Schiffsfahrten aus Großausführungsmessungen und ergänzende Entwicklungen mit der Software *FME (Feature Manipulating Engine)*, können - basierend auf einer abgeleiteten Basisleitlinie - durch Einzelpositionierung der Schiffsumrisse, die Schleppflächen und Fahrspurbreiten unterschiedlicher Schiffstypen ermittelt werden. Dies ermöglicht eine Erweiterung der Untersuchungen und Berücksichtigung innerhalb *RiNA* auf den fließenden Verkehr (Kapitel 5.3).

### 4.2 Abgrenzung zu bestehenden Verfahren

Ein allgemeingültiges oder ganzheitliches Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen existiert nicht. Die Kombination interdisziplinärer Eingangsdaten und Interpretation der elektronischen Navigationskarten zur Befahrbarkeitsanalyse sind in dem entwickelten Bewertungsverfahren *RiNA* einzigartig. In Kapitel 3 wurden einige bestehende Verfahren, Dienste und Untersuchungen erläutert, welche die Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* im Rahmen der Dissertation geprägt haben.

Mit dem Klassifizierungssystem der europäischen Binnenwasserstraßen (Kapitel 3.1) können anhand der Klasse einer Wasserstraße typisch verkehrende Binnenschiffstypen und deren Abmessungen abgeleitet werden. Das Bewertungsverfahren *RiNA* greift - bei der Entwicklung der Befahrbarkeitspotentiale für den fließenden Verkehr - die Binnenschiffstypen aus dem Klassifizierungssystem mit internationaler Bedeutung auf. Dies schafft die Voraussetzung das Verfahren auch auf andere Wasserstraßen anwenden zu können. Die Binnenschiffahrtinformationsdienste (Kapitel 3.2) dienen im Wesentlichen der Unterstützung der Schifffahrt und werden weniger zu Planungszwecken eingesetzt. Die elektronischen Navigationskarten (Inland ENC) sind jedoch ein wesentlicher Bestandteil des entwickelten Bewertungsverfahrens *RiNA* und bieten eine ideale Schnittstelle um die Ergebnisse kombiniert darzustellen. Das Bewertungsverfahren ist nicht nur als ein Planungsinstrument zu sehen, sondern kann - abgesehen davon - den Schiffsführern die Berechnungs-

ergebnisse ggf. als zusätzliche Informationen unterstützend bereitstellen. Für eine Erweiterung des Bewertungsverfahrens *RiNA* vom ungestörten auf den fließenden Verkehr ist eine Abschätzung des Verkehrsflächenbedarfs eines Schiffes mit vertretbarem und durchführbarem Aufwand erforderlich. Hierfür wurden bestehende fahrdynamische Verfahren (Kapitel 3.3) im Binnenbereich betrachtet. Die folgende Tabelle 4-1 stellt die Verfahren *Trasse*, *Petra1D* und einen Binnenschiffsführungssimulator anschaulich gegenüber. Diese Tabelle gibt einen Überblick der Anwendungsbereiche, der Ausdehnung des Untersuchungsgebietes, Hinweise zur Berücksichtigung der Strömungskenngrößen in einem Gewässer und der Fahrdynamik des Schiffes sowie der erforderlichen Eingangsdaten.

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der fahrdynamischen Verfahren *Trasse*, *Petra1D* und dem Binnenschiffsführungssimulator

		Trassierungsverfahren Trasse (1995)	Pegelabhängige Trassierung Petra1D (2000)	Binnenschiffsführungssimulator (2009)
<b>Untersuchungsgebiet</b>		Klein- und Großräumige Untersuchungen (bis etwa 100 km)	Klein- und Großräumige Untersuchungen (bis etwa 100 km)	Kleinräumige Untersuchungen (bis etwa 10 km)
<b>Gewässer</b>		Kanäle Schwach fließende Gewässer (Fließgeschwindigkeiten $\leq 0,5$ m/s)	Kanäle Fließgewässer	Kanäle Fließgewässer
<b>Strömung</b>	<b>Verfahren</b>	Kein Strömungsmodell	1D-HN-Modell	2D-HN-Modell
	<b>Verteilung</b>	Nicht berücksichtigt	Strömungsinformationen am Querprofil	Strömungsinformationen flächig
	<b>Geschwindigkeiten</b>	Nicht berücksichtigt	Nur Hauptströmungsrichtung am Querprofil, keine Querströmung	Tiefengemittelte Strömungsinformationen, keine vertikalen Strömungsanteile
	<b>Fließtiefen</b>	Als ausreichend vorausgesetzt	Verteilung über das Querprofil	Flächige Verteilung
<b>Schiff / Fahrdynamik</b>	<b>Verfahren</b>	Graewe Verfahren	Ebene Bewegungsgleichungen	Ebene Bewegungsgleichungen
	<b>Schiffsposition</b>	Einzelpositionierung des Schiffes entlang der Kursachse im taktischen Drehpunkt	Einzelpositionierung des Schiffes entlang der Kursachse im taktischen Drehpunkt	Antriebsleistung, Heck- und Bugruderanlagen
	<b>Steuerung</b>	Keine Schiffsbewegung	Geschwindigkeit des Schiffes über Grund zu Berg/Tal	Manuelle Navigation (human factor) oder Autopilot
	<b>Tiefgang</b>	Angepasst an durchgehende Fließtiefen	Individuell berücksichtigt	Individuell berücksichtigt
	<b>Interaktion Schiff/Schiff</b>	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt
	<b>Interaktion Schiff/Wasserstraße</b>	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt (in Weiterentwicklung)
	<b>Schiffswellen</b>	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt (in Entwicklung)
	<b>Umgebungs-einstellungen</b>	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Sicht-, Wetterbedingungen und Radar
<b>Eingangsdaten</b>	<b>Gewässer-geometrie</b>	Nicht berücksichtigt	Querprofile aus 1D-HN-Modell	Digitales Geländemodell
	<b>Strömung</b>	Nicht berücksichtigt	Strömungsinformationen am Querprofil aus 1D-HN-Modell	Tiefengemittelte Strömungsinformationen aus 2D-HN-Modell
	<b>Schiff</b>	Länge, Breite und $C_F$ -Wert konstant aus Versuchsreihen	Koeffizientensatz mit schiffsspezifischen Parametern für $C_F$ -Wertberechnung	Kalibriertes fahrdynamisches Modell des Bemessungsschiffes
	<b>Karte</b>	DBWK (optional)	DBWK (optional)	Inland ENC
	<b>Leitlinie</b>	Kursachse	Kursachse und Krümmungsradien	ggf. Kursachse bzw. Bahnkurve
<b>Anwendung</b>		Verkehrsflächenbedarf bzw. Fahrspurbreite im Kanal bzw. schwach fließenden Gewässer	Kursachsengenerierung und Verkehrsflächenbedarf bzw. Fahrspurbreite im Kanal bzw. Fließgewässer	Aus-/Weiterbildung, Infrastrukturplanung, Durchführung von Simulationsfahrten zur Befahrbarkeit, Havarieermittlung/-prävention, Variantenuntersuchungen, Verkehrsflächenbedarf

Die Entwicklungshistorie und Beschreibung der einzelnen fahrdynamischen Verfahren macht deutlich, dass zunehmend komplexere Fragestellungen bearbeitet werden und dabei versucht wird, die physikalischen Effekte möglichst korrekt abzubilden. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass der Aufwand von der Bereitstellung der erforderlichen Daten, dem Aufbau der Modelle bis zur eigentlichen Durchführung der Untersuchung, zunimmt.

Für die Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* zur flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit konnten Grundgedanken der unterschiedlichen fahrdynamischen Verfahren aufgegriffen und ziel führend weiterentwickelt und kombiniert werden. Aufgrund der Notwendigkeit der vergleichsweise zeitnahen Bereitstellung von Fahrspurbreiten für verschiedene Schiffstypen wird für die Entwicklung der Befahrbarkeitspotentiale für den fließenden Verkehr, die Idee Schiffsbewegungen aus Trassierungsverfahren abzuleiten, aufgegriffen und in dem entwickelten Bewertungsverfahren entsprechend berücksichtigt. So wurde die Einzelpositionierung der Schiffsumrisse entlang einer Kursachse aus dem Verfahren *Trasse* (Kapitel 3.3.1), welches vorrangig zur Berechnung des Verkehrsflächenbedarfs in Kanälen bestimmt ist, aufgegriffen. Allerdings wird diese in dem entwickelten Bewertungsverfahren *RiNA* auf den Schwerpunkt des Schiffes bezogen weiterentwickelt und für fließende Gewässer durch Auswertung von aktuellen Großausführungsmessungen erweitert. Aus dem auf einem eindimensionalen Strömungsmodell basierenden Verfahren *Petra1D* (Kapitel 3.3.2), welches zur Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs bzw. zur Generierung von Kursachsen entwickelt wurde, wurde die Idee der Potentiale an den Querprofilen auf ein zweidimensionales Strömungsmodell weiterentwickelt. Mit dem Verfahren *Petra1D* ist eine flächige Darstellung der Befahrbarkeit nicht gegeben und ferner werden die Gegebenheiten zwischen den Querprofilen (häufig 100 m Abstände) nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist eine Streckenvergleichbarkeit hinsichtlich der Potentialentwicklung in dem Verfahren nicht gewährleistet, da die Parameter in einem Querprofil auf die jeweiligen Maximalwerte des Profils normiert werden. Mit einem Binnenschiffsführungssimulator (Kapitel 3.3.3) können Simulationsfahrten durchgeführt werden, welche belegen, ob eine vorgegebene Bahnkurve befahrbar ist. Bewertet werden allein die durchgeführte Fahrt bzw. Fahrten. Es können keine flächenhaften Darstellungen zur Befahrbarkeit gemacht und beurteilt werden. Aussagen zu treffen über die Sicherheit und Leichtigkeit einer Fahrt ist daher nicht trivial und müssen über (Sicherheits-) Abstände und vergleichende Analysen z. B. Drehzahl, Ruderwinkel bzw. -aktivität, Bugstrahlruderanforderung, Fahrspurbreite etc. ermittelt werden. *Gronarz* verwendet in seinen Untersuchungen die Definition von „Reserven“ (z. B. Ruderwinkel-, Bugstrahl-, Drehzahl- und Ruderaktivitätsreserve). Je höher die Reserve, umso leichter wäre die Befahrung (*Gronarz, 2015 [38]*). In dem Bewertungsverfahren *RiNA* ist eine Zonen auswertung möglich, sodass z. B. auch im Umfeld eines Schiffes die Potentialwerte hinsichtlich Befahrbarkeit analysiert werden können. Zudem sind bei einem Binnenschiffsführungssimulator der Aufbau eines Fahrtreviers, die Modellierung des Schiffes, die Integration der Strömungsinformationen und die Durchführung sowie die Analyse der Simulationsfahrten vergleichsweise aufwändig. Ein Binnenschiffsführungssimulator nutzt die Inland ENC als Datenbasis für die Erstellung des Sichtmodells und zum Abgreifen der Strömungsinformationen. Die Inland ENC ist - wie bereits oben erwähnt - eine ideale Schnittstelle um die Ergebnisse des entwickelten Bewertungsverfahrens *RiNA* kombiniert darzustellen. Des Weiteren werden in dem Bewertungsverfahren nautisch relevante Informationen aus der Inland ENC interpretiert und u. a. mit Strömungsinformationen aus einem



zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell kombiniert. Über eine Schnittstelle können die im Binnenschiffsführungssimulator berechneten Kenngrößen in dem Verfahren *RiNA* mit den hydrodynamisch-numerischen Berechnungsergebnissen, den entwickelten Einzel- bzw. Gesamtpotentialen (Befahrbarkeitspotentiale) oder verfügbaren Geodaten wie z. B. Kartenmaterial in einer flächigen Darstellung verknüpft und ausgewertet werden. Umgekehrt kann eine aus den Befahrbarkeitspotentialen abgeleitete Basisleitlinie an den Binnenschiffsführungssimulator übergeben, nachgefahren und ausgewertet bzw. optimiert werden, da in *RiNA* derzeit noch nicht geprüft werden kann, ob die ermittelte Basisleitlinie real gefahren werden kann. Hierbei ergänzen und stärken sich die Verfahren in der Anwendung gegenseitig. Eine objektive Analyse und Beurteilung von Simulationsfahrten oder Fahrten aus Großausführungsmessungen auf Basis hydrodynamisch-numerischer Kenngrößen unter Berücksichtigung nautisch relevanter Informationen wie in *RiNA* wäre ein Fortschritt und eine Bereicherung bestehender Verfahren. Je nach Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchung muss das geeignete Verfahren ausgewählt werden. Beim Einsatz sollte der allgemeine Grundsatz gelten, nicht so genau wie möglich zu modellieren, sondern so genau wie notwendig.

### 4.3 Geoinformationssysteme und Informationen zu den Bestandteilen des Bewertungsverfahrens

Geoinformationssysteme (GIS) werden genutzt, um unterschiedliche interdisziplinäre Geodaten in ein gemeinsames System zu überführen, aufzubereiten und zu verarbeiten. Geoinformationssysteme dienen der Erfassung, Bearbeitung, Koordinatentransformation, Planung, Organisation, Analyse und Präsentation von geographischen Daten und eignen sich daher für eine darauf aufbauende Entwicklung eines Softwaresystems.

Geodaten lassen sich im Allgemeinen in drei wesentliche Datentypen unterteilen, die Vektordaten, triangulierte irreguläre Netzwerke (TIN) und Rasterdaten. Diese gängigen Datentypen kommen auch bei der Anwendung des Bewertungsverfahrens *RiNA* zum Einsatz. Bei Vektordaten handelt es sich um Punkte, Linien oder Flächen (Polygone). Punkte werden über ihre Koordinaten definiert, Linien und Flächen über die Koordinaten ihrer Basispunkte. Vektordaten werden über eine Attributtabelle Eigenschaften oder Zahlenwerte zugewiesen und besitzen das Datenformat „Shapefile“ (\*.shp). TINs ergeben sich aus der zweidimensionalen Vernetzung unregelmäßig verteilter Raumpunkte zu Dreieckselementen. Um eine strukturierte flächige Verteilung (Raster) dieser Werte zu erhalten, wird innerhalb der Dreieckselemente interpoliert. Jeder Rasterzelle wird ein Wert zugewiesen. Die Rasterdaten sind in einer Zeilen-Spalten-Struktur organisiert. Jede Rasterzelle ist über die Spalten- und Zeilenzugehörigkeit, die Lagekoordinaten des Rasterursprungs sowie die Zellauflösung definiert.

Das Bewertungsverfahren *RiNA* wurde auf Basis eines weltweit verbreiteten Geoinformationssystems (Programmsystem *ArcGIS* des Softwareunternehmens *ESRI*) in Form einer integrierten Fachschale entwickelt, um bereits bestehende Funktionalitäten (z. B. Ansichtsfenster, Inhaltsverzeichnis, Bibliothek zur Koordinatentransformation, Funktionen des Geoprocessors bzw. der Toolbox u. a.) verwenden und kombinieren zu können. Das Bewertungsverfahren stützt sich auf Eingangsdaten aus unterschiedlichen Fachbereichen (Informationen aus der Inland ENC und ggf. Zusatzinformationen,

Strömungsinformationen aus Flussgebietsmodellen sowie Kenngrößen eines Binnenschiffes bzw. Fahrrinnenanforderungen). Die Gewässergeometrie wird in den Strömungsmodellen berücksichtigt. Diese interdisziplinären Geodaten werden in ein gemeinsames System überführt.

### 4.3.1 Informationen aus der Inland ENC und Zusatzinformationen

Die elektronischen Navigationskarten (Inland ENC) sind ein wesentlicher Baustein des Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) und bereits in Kapitel 3.2 beschrieben. Bei den Inland ENCs handelt es sich um Geodaten, welche u. a. in einem GIS dargestellt, interpretiert und mit weiteren Informationen überlagert werden können. Die vektorbasierten Navigationskarten im S-57 Datenstandard können durch einen zusätzlichen *S-57 Viewer* im Programmsystem *ArcGIS* des Softwareunternehmens *ESRI* dargestellt werden. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) erstellt und unterhält die Inland ENCs im WGS84 Koordinatensystem und stellt diese für die Binnenwasserstraßen Deutschlands auf dem Internetportal der WSV (ELWIS<sup>4</sup>) kostenfrei zur Verfügung. Die Anknüpfung des Bewertungsverfahrens *RiNA* an diesen weltweit kompatiblen und harmonisierten Standard der Inland ENC eröffnet neue Anwendungsbereiche.

Innerhalb des Bewertungsverfahrens *RiNA* werden nautisch relevante Objekte (z. B. Fahrrinnenabmessungen, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Liegestellen, Brückenpfeiler, Uferbauwerke etc.) aus der Inland ENC interpretiert und in eine Bewertung der Befahrbarkeit von Fließgewässern einbezogen. Die Potentialentwicklung aus Inland ENC Objekten wird in Kapitel 4.4.1 aufgezeigt. Die Tabelle 4-2 stellt einen Auszug aus der Objektliste der Inland ENC dar. Die deutsche Bezeichnung der sechsstelligen, englischen Kürzel wurde in Anlehnung an den Inland ENC WMS (Web Map Service) der WSV gewählt. Im Anhang 3 ist eine Liste der Inland ENC Objekte dargestellt.

Je nach Qualität und Vollständigkeit der Inland ENCs müssen ggf. ergänzende Geodaten (z. B. Brückendurchfahrtsregeln, Fahrrinnenteilungen etc.) bei der Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* mit berücksichtigt werden. Des Weiteren können abfluss- bzw. wasserstandabhängige Verkehrsregeln hinzukommen, wie z. B. die Einschränkung, dass ab Erreichen der Hochwassermarke I bis II an einem streckenbezogenen Pegel am Rhein, Bergfahrer im mittleren Drittel des Stromes und Talfahrer möglichst in der Mitte fahren müssen (RheinSchPV; WSV, 2014 [86]).

---

<sup>4</sup> <https://www.elwis.de/Service/Inland-ENC-der-WSV/IENC-Dateien/index.php.html>  
abgerufen am 01.08.2016

Tabelle 4-2: Nautisch relevante Objekte als Auszug aus der Objektliste der Inland ENC (Anhang 3)

Kürzel für die Objekte der Inland ENC		
*Bezeichnung in Anlehnung an den InlandENC WMS der WSV		
Englische Bezeichnung	Kürzel	Deutsche Bezeichnung*
anchorage area	achare	Ankerplatzbereich
berth	berths	Liegeplatz
buoy, lateral	boylat	Tonne, laterale
buoy, special purpose/general	boyspp	Tonne, Sonstige/Allgemeine
buoy water-way	boywtw	Tonne
bridge area	brgare	Brueckenbereich
bridge	bridge	Bruecke
canal bank	canbnk	Kanalufer
coastline	coalne	Uferlinie
caution area	ctnare	Warnbereich
current, non-gravitational	curent	Stroemung, nicht gravitationsbedingt
daymark	daymar	Bake
depth area	depare	Tiefenbereich
depth contour	depcnt	Tiefenlinie
fairway	fairwy	Fahrwasser/Fahrinne
ferry route	feryrt	Faehrweg
floating dock	flodoc	Schwimmdock
land area	ldare	Landflaeche
land region	lndrgn	Landregion
obstruction	obstrn	Schiffahrtshindernis
pontoon	ponton	Ponton
pylon/bridge support	pylons	Pylon
restricted area	resare	Sperrgebiet
river bank	rivbnk	Flussufer
river	rivers	Fluesse
shoreline construction	slcons	Uferbauten
waterway axis	wtwaxs	Wasserstrassenachse
waterway profile	wtwprf	Wasserstrassenprofil

### 4.3.2 Strömungsinformationen aus hydrodynamisch-numerischen Modellen

Im Zusammenhang mit hydrodynamisch-numerischen Modellen (HN-Modell) werden Geo-informationssysteme u. a. zur Aufbereitung und Erstellung digitaler Geländemodelle (DGM), zur Erzeugung relevanter Bruchkanten und der Definition der Fließwiderstände sowie zur Visualisierung der Berechnungsergebnisse verwendet. Die gegebene Geometrie (Ausgangszustand) bzw. die vorgegebene Geometrie (Variantenstudium) ist die Grundlage beim Aufbau hydrodynamisch-numerischer Strömungsmodelle (Kapitel 2.2). Basierend auf der Geometrie werden Gitter (z. B. Querprofile bei 1D-HN-Modellen oder strukturierte bzw. unstrukturierte Gitter bei 2D- / 3D-HN-Modellen) erstellt und an den jeweiligen Gitterknoten die hydraulischen Kenngrößen berechnet. Die Berechnungsergebnisse der HN-Modelle werden meist als Vektor- bzw. Rasterdaten visualisiert.

Für das Bewertungsverfahren *RiNA* ist der Einsatz zweidimensionaler, hydrodynamisch-numerischer Modelle das geeignete Mittel, möglichst zeitnah und flächendeckend stationäre, hochaufgelöste Strömungsinformationen in einem Untersuchungsgebiet bei unterschiedlichen Abflüssen und Randbedingungen zu erhalten. Für die Verfahrensentwicklung (Kapitel 4) und in den beiden Fallstudien (Kapitel 5) wurde für die Fließgewässermodellierung exemplarisch das 2D-HN-Verfahren *TELEMAC-2D* (*Telemac Modelling System*, 2013 [78]; *Hervouet*, 2008 [48]) verwendet. Das Verfahren

ist geeignet zur Simulation stationärer und instationärer Strömungsprozesse und des Transports konservativer Tracer in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Es wurde von der Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) der Electricité de France (EDF) für fluss- und wasserbauliche Fragestellungen entwickelt. *TELEMAC-2D* löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) auf unstrukturierten Dreiecksgittern. Die unstrukturierten Rechengitter ermöglichen eine unterschiedlich feine Diskretisierung verschiedener Teilgebiete. Sowohl strömender als auch schießender Abfluss kann mit dem Verfahren berechnet werden. Wesentliche Ergebnisse an jedem Knoten eines Rechengitters sind neben der Wassertiefe die tiefengemittelten Geschwindigkeitskomponenten. Bei *TELEMAC-2D* handelt es sich um ein parallelisiertes Verfahren, welches auf einem High Performance Computing (HPC) Cluster eingesetzt werden kann.

Das entwickelte Bewertungsverfahren *RiNA* wurde so gestaltet, dass es verfahrensunabhängig ist, d. h., dass stationäre Strömungskenngrößen von anderen zweidimensionalen Berechnungsverfahren ebenfalls berücksichtigt werden können. Bei zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Verfahren ist die hoch aufgelöste flächige Verteilung der Strömungskenngrößen im Untersuchungsgebiet von Vorteil. Auf der sicheren Seite liegend, sollte sich die Wahl der Zellauflösung für die Verarbeitung der Rasterdaten innerhalb *RiNA* an den Elementgrößen des HN-Modells orientieren. Die Strömungskenngrößen liegen meist in einem lokalen bzw. relativen Koordinatensystem vor und müssen ggf. in das Zielkoordinatensystem transformiert werden.

Die für eine Beurteilung und Bewertung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen maßgebenden Kenngrößen aus den Strömungsmodellen sind zum einen die Fließtiefen und zum anderen die Fließgeschwindigkeiten. Wie die Strömungskenngrößen in das Bewertungsverfahren eingehen und berücksichtigt werden, wird bei der Einzelpotentialentwicklung in Kapitel 4.4.1 oder in den beiden Fallstudien in Kapitel 5 aufgezeigt. Je nach Abflusszustand und Fahrtrichtung eines Binnenschiffes werden Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit anteilig mehr oder weniger berücksichtigt. So sucht der Bergfahrer z. B. Bereiche mit vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten und der Talfahrer hingegen hohe Fließgeschwindigkeiten. Dafür bevorzugen sowohl Tal- als auch Bergfahrer tiefes Wasser. Bei hohen Abflusszuständen ist die Fließtiefe jedoch aufgrund der großen Wassertiefen meist weniger relevant als im Niedrigwasserbereich.

Die Gewässergeometrie wird implizit durch die berechneten Strömungskenngrößen berücksichtigt, aber auch andere Ansätze wie z. B. die Bestimmung der Krümmungsradien oder des Querströmungseinflusses (Kapitel 5.2.8) wären denkbar. Beispielsweise können bei einer Ermittlung der Befahrbarkeit die Querströmungseinflüsse auf eine anfangs angenommene Bahnkurve und später iterativ auf die bestmögliche Bahnkurve berücksichtigt werden. Hierfür müssen die Fließgeschwindigkeiten des Gewässers zunächst in Anteile längs und quer zu der potentiellen Bahnkurve umgerechnet werden. Aber auch weitere berechnete Strömungskenngrößen wie z. B. die morphodynamische Aktivität eines Fließgewässers abgeleitet aus der Schubspannung in Kombination mit der Korngrößenverteilung des Gewässers bzw. der Beschaffenheit der Sohle, können für eine Bewertung in einzelnen Streckenabschnitten relevant sein.

### 4.3.3 Kenngrößen eines Binnenschiffes bzw. Fahrrinnenanforderungen

In einem Fließgewässer mit einer ausreichend breiten Fahrrinne werden von einem Schiffsführer bei der Wahl der Bahnkurve in der Berg- bzw. Talfahrt die örtlichen Gegebenheiten mit berücksichtigt. Im ungestörten Verkehr wird die Bahnkurve überwiegend durch die Gewässergeometrie und die örtliche Verteilung der Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten des Gewässers bestimmt. Des Weiteren haben nicht nur die Strömungskenngrößen Einfluss auf die potentielle Bahnkurve, sondern auch Schiffstyp bzw. die Abmessungen (Länge und Breite) des Schiffes, die Fahrtrichtung, der gewünschte Tiefgang und die Fahrgeschwindigkeit. Ein tief abgeladenes Tankmotorschiff wird sich mehr nach den Fließtiefen und ein Containerschiff mit vergleichsweise geringerem Tiefgang mehr nach den Fließgeschwindigkeiten richten. Trotz gleicher Abmessungen fahren beide Schiffe auf verschiedenen Bahnkurven. Die Befahrbarkeit eines Gewässers kann innerhalb des Bewertungsverfahrens *RiNA* individuell bezogen auf einen Schiffstyp oder allgemein basierend auf Fahrrinnenanforderungen bestimmt werden.

Für eine flächige Visualisierung der Befahrbarkeit muss deshalb ein sogenannter Tiefenanspruch festgelegt werden, der sich für ein Binnenschiff aus Tiefgang, Squat, Flottwasser und Sicherheitsabständen zusammensetzt oder anhand der abflussabhängig freigegebenen Fahrrinntiefe definiert werden kann (*BMVBS, 2014 [12]*). Ebenfalls muss ein oberer Tiefenfreigabewert (Summe der zuvor genannten Kenngrößen oder Tiefenanspruch plus Sicherheitszuschlag) definiert werden, der einem Idealwert bezogen auf die Tiefe bei einer Fahrt entspricht. Des Weiteren muss die Fahrtrichtung und eine Geschwindigkeitsgrenze des Schiffes festgelegt werden, denn bei einem Bergfahrer muss die Geschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser größer als die vorliegende Strömungsgeschwindigkeit sein, um vorwärts zu kommen (Gleichung [2-13] in Kapitel 2.1.2). Hingegen würde ein Talfahrer das schnelle Fahrwasser suchen, um vergleichsweise schnell und energiesparend zu fahren. Hierbei werden technische Vorgaben aus der Binnenschiffahrtsuntersuchungsordnung wie die definierten Anforderungen an die Mindestgeschwindigkeit (*WSV, 2014 [85]*) berücksichtigt. Diese Benutzereingaben sind für die Potentialentwicklung der Strömungskenngrößen aus den HN-Modellen erforderlich (Kapitel 4.4.1) und in den beiden Fallstudien eingangs dokumentiert (Kapitel 5).

Je nach Abflussszenario, Schiffstyp, Veränderung des Tiefgangs, Berg- bzw. Talfahrt verändert sich die Befahrbarkeit eines Fließgewässers. Basierend auf den Ergebnissen des Bewertungsverfahrens kann eine Basisleitlinie (ggf. Basisleitlinien) konstruiert werden (Kapitel 5.3.3), welche einen potentiellen Fahrweg vorgibt. Diese Leitlinie(n) können über eine Schnittstelle in einen Binnenschiffsführungssimulator integriert und von einem Schiffsführer oder mittels einer automatischen Bahnführung (Autopilot) nachgefahren werden. Als Ergebnis erhält man z. B. die Fahrspurbreiten des Schiffes, die auf das Schiff wirkenden Kräfte und Momente sowie die Aussage, ob diese Leitlinie befahrbar ist. Vereinfacht kann alternativ, basierend auf der Auswertung zahlreicher aufgezeichneter Schiffsfahrten in dem relevanten Streckenabschnitt, eine vereinfachte Driftwinkel-Radiusbeziehung entwickelt werden (Kapitel 5.3.4) und daraus die Schleppfläche und Fahrspurbreiten (Kapitel 5.3.5) bestimmt werden. Die Schleppfläche bzw. Fahrspurbreiten sind für die Potentialentwicklung im fließenden Verkehr (Kapitel 5.3.6) erforderlich.

## 4.4 Potentialentwicklung

Die interdisziplinären Daten (Vektor- und Rasterdaten aus unterschiedlichen Fachbereichen) müssen zunächst in ein gemeinsames System (z. B. Geoinformationssystem) durch ggf. Koordinatentransformation überführt werden. Abbildung 4-2 zeigt die schematische Darstellung zur Verfahrensentwicklung, bestehend aus einem gemeinsamen Bezugssystem, den Bearbeitungsebenen der verschiedenen Fachbereiche und der Ergebnisebene. Die Abkürzung KOS steht für Koordinatensystem.

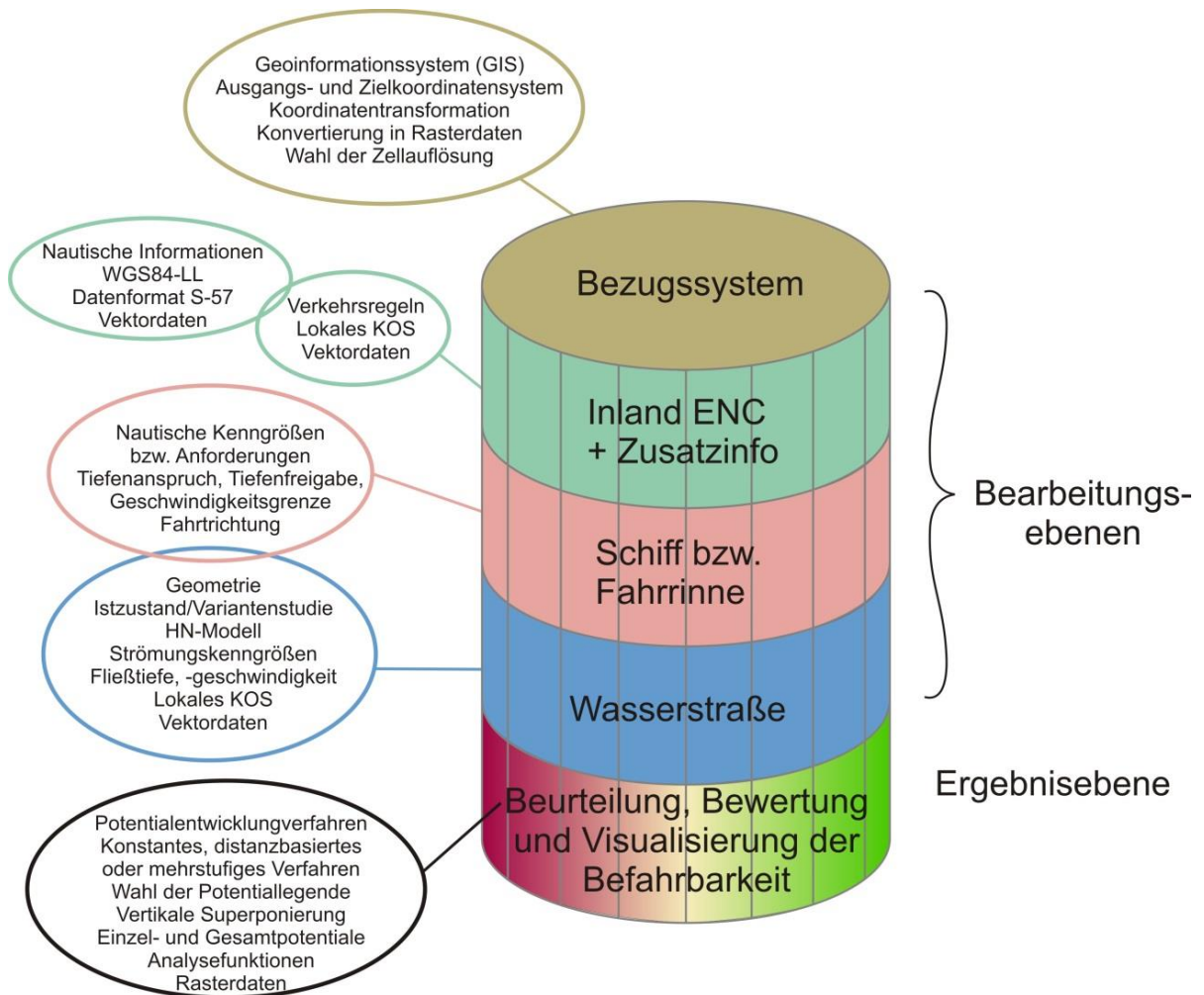


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung zur Verfahrensentwicklung

Die Geodaten bzw. Eingangsdaten im Bezugssystem müssen, sofern nicht bereits Rasterinformationen vorliegen, zu Rasterdatensätzen (z. B. durch Triangulierung, Konvertierung) verarbeitet werden, um in den Bearbeitungsebenen geeignete Berechnungsoperationen (Normierung, Reklassifizierung, Wichtung) in der Fläche durchführen zu können. Nach Vergabe der Sicherheitsabstände (z. B. bei Fahrrinnenbegrenzungs tonnen, Brückenpfeilern etc.), Festlegung des Potentialentwicklungsverfahrens und Verteilung der Potentialwerte können die verschiedenen Einzelpotentiale (Kapitel 4.4.1) berechnet werden. Durch geeignete Kombination der Einzelpotentiale wird in der Ergebnisebene das Gesamtpotential (Kapitel 4.4.2) entwickelt und somit eine Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen ermöglicht.



Im Vorfeld muss eine Legende für die Potentialentwicklung festgelegt werden. Gültige dimensionslose Potentialwerte für eine gängige Legende sind z. B. von 0 bis 100. Die Diskretisierung der Legende bzw. die farbliche Abstufung erfolgt z. B. in 10er Schritten (siehe Abbildung 4-3, links). Der Potentialwert Null (brauner Farbton) steht für nicht befahrbar. Die Voraussetzungen der Befahrbarkeit für ein Schiff z. B. ausreichende Wassertiefe oder freier Liegeplatz sind nicht erfüllt. Die Rot- bzw. Grüntöne zeigen an, dass die Voraussetzungen für eine Befahrbarkeit von schlecht (rot), gut (gelb bzw. hellgrün) bzw. sehr gut (dunkelgrün) hinsichtlich eines einzelnen Kriteriums (Einzelpotential) oder der Kombination verschiedener Einzelpotentiale zu sogenannten Gesamtpotentialen gegeben sind. Für die Potentialwertlegende können je nach Fragestellung z. B. auch feinere Diskretisierungen (z. B. 20, 5, 1) festgelegt und die Minimal- bzw. Maximalwerte angepasst werden (siehe Abbildung 4-3).

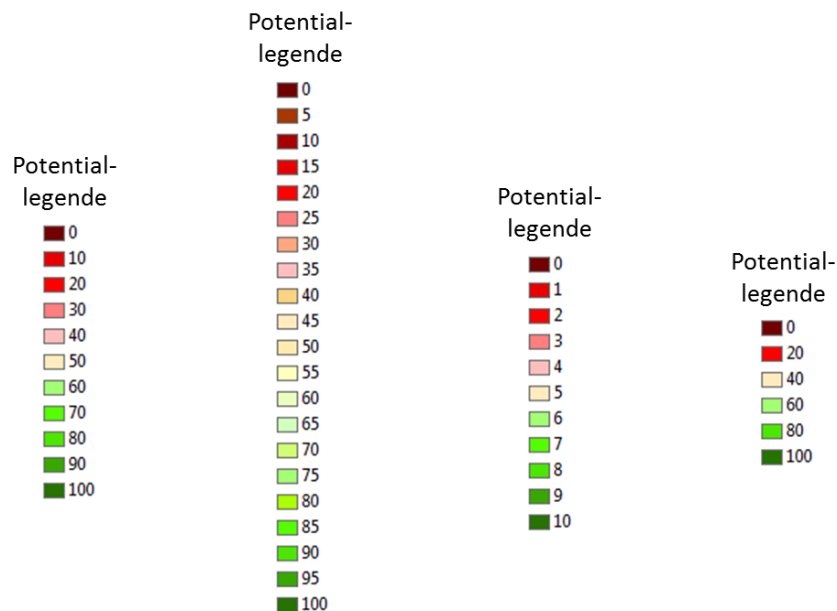


Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung möglicher Potentiallegenden z. B. von 0 bis 100 und einer Diskretisierung von 10 (links)

### 4.4.1 Einzelpotentialentwicklung

Je nach Fragestellung, Datengrundlage und Untersuchungsgebietsgröße müssen bei der Potentialentwicklung geeignete Kriterien bestimmt werden. Nicht nur die Wahl der Objekte bzw. Parameter (u. a. Fahrinne, Liegestellen, Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit) für die Einzelpotentialbildung müssen definiert werden, sondern auch Sicherheitsabstände, -zuschläge, Geschwindigkeits- und Tiefgangsvorgaben sowie die Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Potentialentwicklung (z. B. konstantes, distanzbasiertes oder mehrstufiges Verfahren) und die Zellauflösung müssen festgelegt werden.

#### 4.4.1.1 Informationen aus der Inland ENC und Zusatzinformationen

Die Potentialentwicklung aus nautisch relevanten Informationen aus der Inland ENC (u. a. Fahrrinne, Liegestellen, Tonnen) wird in Abbildung 4-4 exemplarisch aufgezeigt. Hierfür wird das spezielle Datenformat S-57 der vektorbasierten Inland ENC interpretiert und in sogenannte „Punkt-, Linien- oder Flächen-Shapefiles“ überführt sowie in das Zielkoordinatensystem transformiert. Die weltweit verbreiteten Inland ENCs liegen im geographischen Koordinatensystem des WGS84 vor und müssen z. B. für eine Überlagerung mit den Strömungskenngrößen aus den Flussgebietsmodellen in ein gemeinsames Koordinatensystem (z. B. am Rhein das kartesische Gauss-Krüger-Koordinatensystem im 2. und 3. Meridianstreifen) transformiert werden. Für jedes zu berücksichtigende Objekt (Kapitel 4.3.1) kann nach Bedarf ein Sicherheitsabstand (z. B. um einen Brückenpfeiler, Liegestellen etc.) definiert und der Potentialwert benutzerdefiniert festgelegt werden. Anschließend werden die „Shapefiles“ bei der konstanten Potentialentwicklung gemäß des angegebenen Potentialwertes im Gültigkeitsbereich der Potentiallegende und der gewünschten Zellauflösung in Rasterdaten überführt. Diese Rasterdaten werden mit der eingangs definierten Potentiallegende dargestellt.

Dies stellt das einfachste Verfahren der Einzelpotentialentwicklung  $EP_{ij}$  mit konstanten Potentialwerten dar:

$$EP_{ij} = \text{const.} \quad [4-1]$$

$EP_{ij}$     Einzelpotential des Objektes  $i$  (z. B. Fahrrinne) an der Stelle  $j$  [-]

const.    Konstanter Potentialwert im Gültigkeitsbereich der Potentiallegende [-]

Mit dem Index  $i$  ist der Bezug des Einzelpotentials zu dem Objekt (z. B. Fahrrinne, Liegestelle, Tonne, Hochwasserregel) definiert und der Index  $j$  kennzeichnet die Stelle der Zelle im Rasterdatensatz des Untersuchungsgebietes. Der Benutzer legt die Potentialwerte für die einzelnen Objekte aus der Inland ENC entsprechend der Werte aus der ausgewählten Potentiallegende fest, z. B. erhält eine besetzte Liegestelle den Potentialwert Null für nicht befahrbar und die Fahrrinne z. B. mit dem Potentialwert 100 ein sehr gutes Potential (siehe Abbildung 4-4).



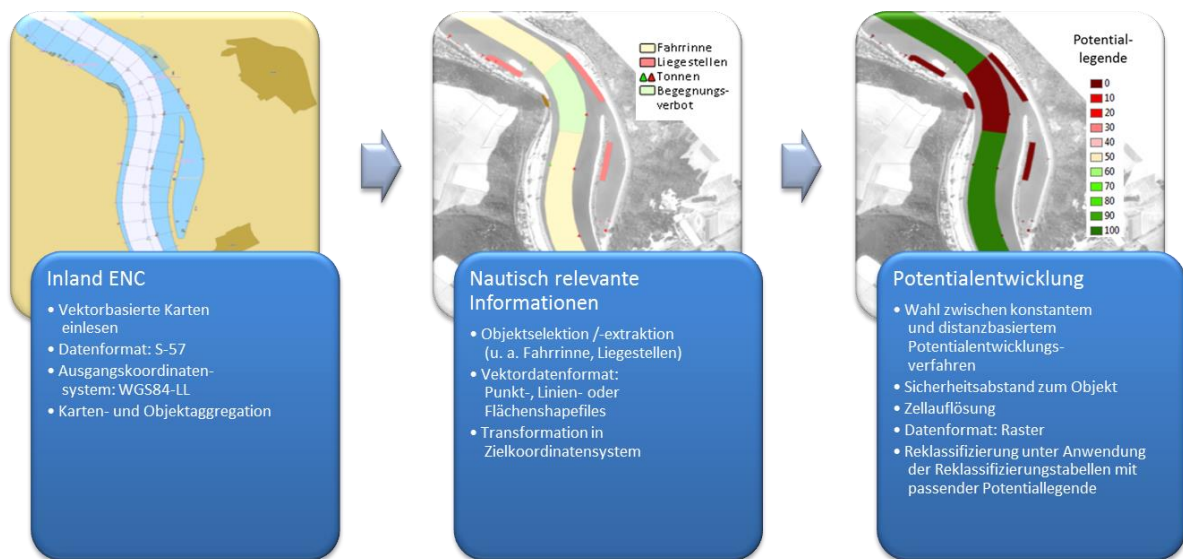


Abbildung 4-4: Exemplarische Potentialentwicklung aus nautisch relevanten Informationen aus der Inland ENC; z. B. für Fahrrinnenbereich (Potential 100), besetzte Liegestellen (Potential 0), Begegnungsverbot (Potential 0, nur bei Untersuchungen des fließenden Verkehrs), Fahrrinnenbegrenzungstonnen (Potential 0) u. a.

Bei der Potentialentwicklung aus Objekten der Inland ENC kann zwischen zwei Verfahren, dem konstanten - wie bereits oben erläutert - oder dem abgestuften (distanzbasierten) Potentialentwicklungsverfahren, gewählt werden. Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch die Potentialentwicklung einer Fahrrinnenbegrenzungstonne vor dem Hintergrund digitaler Orthophotos, indem auch die Tonne erkennbar ist (links). Die mittige Abbildung zeigt das Potential der Fahrrinnenbegrenzungstonne bei konstanter Potentialwertvergabe mit einem gewählten Sicherheitsabstand von 5 m und die rechte Abbildung mit einem mit zunehmender Entfernung zu der Tonne abgestuften Potentialentwicklungsverfahren.

Mit Hilfe einer euklidischen Entfernungsanalyse wird von einer Rasterzelle die Entfernung zur nächstgelegenen Quelle („Punkt-, Linien- oder Flächen-Shapefile“) ermittelt. Zur Vorbereitung für die abschließende Reklassifizierung werden nach der Entfernungsanalyse die berechneten Abstände mit dem maximalen Potentialwert aus der Potentiallegende multipliziert und durch die maximale Distanz aus der Entfernungsanalyse dividiert. Das Einzelpotential  $EP_{ij}$  ist bei dem abgestuften Potentialentwicklungsverfahren beschrieben durch:

$$EP_{ij} = Abstand_{ij} \cdot \frac{Pot_{max}}{Abstand_{i,max}} \quad [4-2]$$

$EP_{ij}$	Einzelpotential des Objektes $i$ (z. B. Tonne) an der Stelle $j$ [-]
$Abstand_{ij}$	Berechneter Abstand an der Stelle $j$ zum Objekt $i$ [m]
$Pot_{max}$	Maximaler Potentialwert aus der Potentiallegende [-]
$Abstand_{i,max}$	Maximaler Abstand aus der Entfernungsanalyse des Objektes $i$ [m]

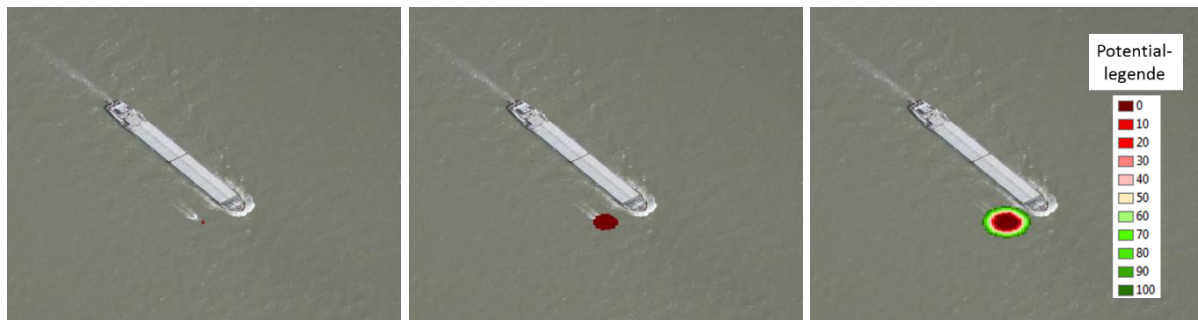


Abbildung 4-5: Potentialentwicklung einer Fahrrinnenbegrenzungstonne: Lage aus der Inland ENC (links); Sicherheitsabstand 5 m und Potentialwertvergabe 0 (mittig); mit zunehmendem Abstand von der Tonne abgestuftes Potential (rechts) (Harlacher, 2016 [43])

Abschließend werden diese Rasterdaten mit der Potentiallegende reklassifiziert. Bei der Reklassifizierung werden die Werte in einem Raster neu zugeordnet. Für die Potentialentwicklung der Inland ENC Objekte wurden folgende Reklassifizierungsbereiche festgelegt (siehe Tabelle 4-3, links). Die Reklassifizierungstabellen werden in dem entwickelten Bewertungsverfahren *RiNA* dynamisch je nach verwendeter Potentiallegende und deren Diskretisierung erstellt. Die Konvertierung und Reklassifizierung sind erforderlich, um die entstehenden Einzelpotentiale hinsichtlich der Legende zu vergleichen bzw. mathematisch zu kombinieren und später durch Wichtungsparemeter die Gesamtpotentiale entwickeln zu können (Kapitel 4.4.2).

Tabelle 4-3: Reklassifizierungstabellen (dynamisch) der distanzbasierten Potentialentwicklung (Inland ENC Objekte)

Reklassifizierungs- bereiche (von - bis)			Inland ENC Objekte, distanzbasiert (invers = wahr)		
-10 000	0		0		
0	1		0		
1	10		10		
10	20		20		
20	30		30		
30	40		40		
40	50		50		
50	60		60		
60	70		70		
70	80		80		
80	90		90		
90	100		100		
100	10 000		100		
NoData			NoData		

Reklassifizierungs- bereiche (von - bis)			Inland ENC Objekte, distanzbasiert (invers = falsch)		
-10 000	0		100		
0	1		100		
1	10		90		
10	20		80		
20	30		70		
30	40		60		
40	50		50		
50	60		40		
60	70		30		
70	80		20		
80	90		10		
90	100		10		
100	10 000		10		
NoData			NoData		

Die beiden Verfahren zur Potentialentwicklung können auf beliebige Objekte aus der Inland ENC angewendet werden, so z. B. auch auf Flächenobjekte wie die Buhnenkörper (siehe Abbildung 4-6). Die Abbildung zeigt die Lage der Buhnen entsprechend den Orthophotos (links) und aus der Inland ENC (mitte). In der Abbildung 4-6 (rechts) sind exemplarisch die abgestuften Potentiale mit zunehmendem Abstand von den Buhnen dargestellt.



Abbildung 4-6: Potentialentwicklung um Buhnen: Lage entsprechend den Orthophotos bzw. aus der Inland ENC (links und mitte); Gewählter Sicherheitsabstand 10 m und abgestuftes Potential mit zunehmendem Abstand von den Buhnen (rechts)

Das distanzbasierte Potentialentwicklungsverfahren kann auch mit inverser Reklassifizierung angewendet werden, um z. B. einer vorhandenen Fahrrinne ein größeres Potential zuzuweisen, welches mit zunehmendem Abstand zur Fahrrinne immer geringer wird (siehe Abbildung 4-7). Allerdings können die Reklassifizierungstabellen nicht einfach vollständig invers angewendet werden (siehe Tabelle 4-3, rechts), sonst wäre am Fahrrinnenrand - wie innerhalb der Fahrrinnenbegrenzungen oder der Buhnen - grundsätzlich das Befahrbarkeitspotential Null.



Abbildung 4-7: Distanzbasiertes Potentialentwicklungsverfahren einer Fahrrinne mit inverser Reklassifizierung

Für eine vollständige Beurteilung und Bewertung der Befahrbarkeit ist es je nach Fragestellung und Untersuchungsgebiet erforderlich, aus zusätzlichen Informationen (z. B. Verkehrsregeln) weitere Einzelpotentiale zu entwickeln. Hierzu zählen u. a. Fahrrinnenteilung, Brückendurchfahrtsregeln, Begegnungs- / Überholverbote, geregelte Begegnungen, Beschränkungen der Schifffahrt bei Hochwasser. Im Folgenden wird exemplarisch aufgezeigt, wie für die Schifffahrt eine Verkehrsregel bei Hochwasser bei der Potentialentwicklung berücksichtigt werden kann.

In der Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV) sind die Beschränkungen der Schifffahrt bei Hochwasser zwischen Hochwassermarke I und II (HWM) in einem Richtpegelabschnitt geregelt (WSV, 2014 [86]). Die Fahrzeuge müssen sich in der Talfahrt möglichst in der Mitte und in der Bergfahrt im

mittleren Drittel des Stromes halten. Exemplarisch ist in Abbildung 4-8 die Potentialentwicklung für die Verkehrsregel, dass sich ein Talfahrer zwischen HWM I und II im Richtpegelabschnitt möglichst in der Mitte halten soll, dargestellt. In Abbildung 4-8 (links) wurde zunächst aus der Fahrrinne (gelber Bereich) die Fahrrinnenachse (rote Achsenlinie) ermittelt, da diese nicht mit der verfügbaren Gewässerachse (blaue Achsenpunkte) aus der Inland ENC übereinstimmen muss. Ausgehend von der zuvor ermittelten Fahrrinnenachse wird beidseitig in einem gewählten Abstand, hier z. B. von 50 m, die Entfernungsanalyse exemplarisch durchgeführt und eine distanzbasierte Potentialentwicklung geschaffen (siehe Abbildung 4-8, rechts).

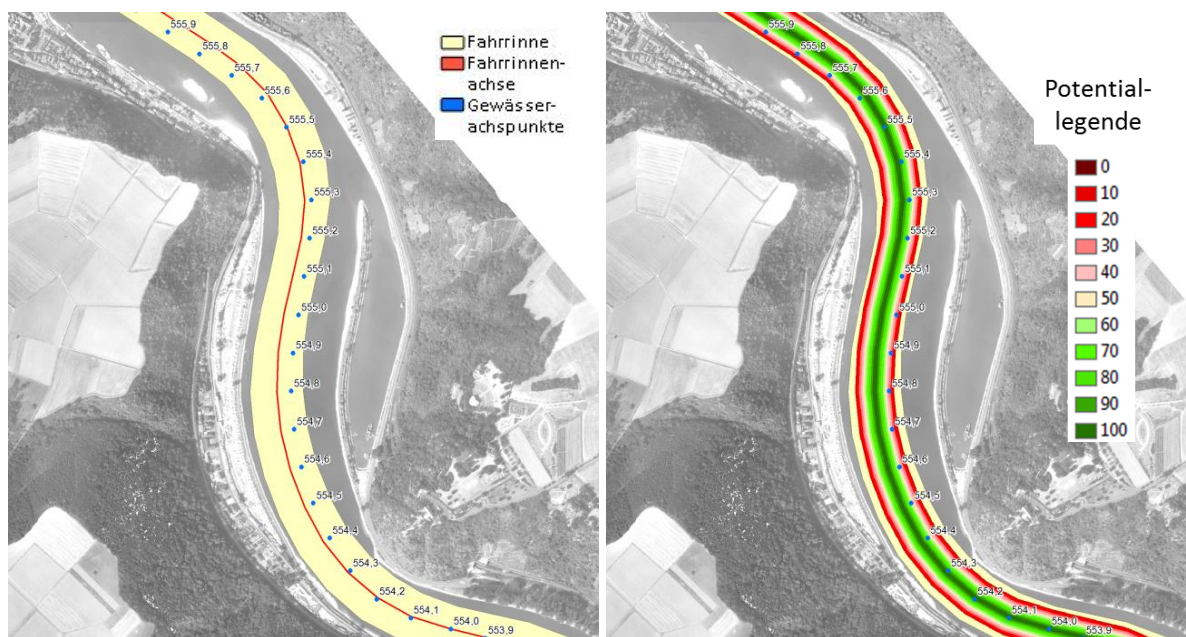


Abbildung 4-8: Potentialentwicklung aus nautisch relevanten Zusatzinformationen (hier: Talfahrer möglichst in der Mitte zwischen Hochwassermarke I und II im Richtpegelabschnitt) (Harlacher, 2016 [43])

Bei Fragestellungen in denen Sicherheitsabstände u. a. um Brückenpfeiler, Liegestellen, Buhnen, Fahrrinnenbegrenzungsstonnen berücksichtigt werden sollen, richtet sich die Zellauflösung an den kleinsten Sicherheitsabständen, damit die Abstände in der flächigen Darstellung bei der Potentialentwicklung erfasst werden können. Zudem sollten vom Benutzer die Anforderungen der Genauigkeit festgelegt werden (z. B. bei der Bestimmung der benötigten Fahrspurbreite für verschiedene Schiffstypen bei veränderlichen Abflussverhältnissen und Schiffsausrüstung).

### 4.4.1.2 Strömungskenngrößen aus HN-Modellen

Die für eine Beurteilung und Bewertung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen wesentlichen Strömungskenngrößen sind zum einen die Fließtiefen und zum anderen die Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 4-9) aus einem zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodell (Kapitel 4.3.2). Für die Potentialentwicklung müssen die berechneten Strömungsergebnisse in einem Rasterdatenformat vorliegen. Im hiesigen Fall wurden am Beispiel eines Hochwasserabflusses die Strömungsinformationen bereits in Rasterdaten mit einer Zellauflösung von 1 m konvertiert.

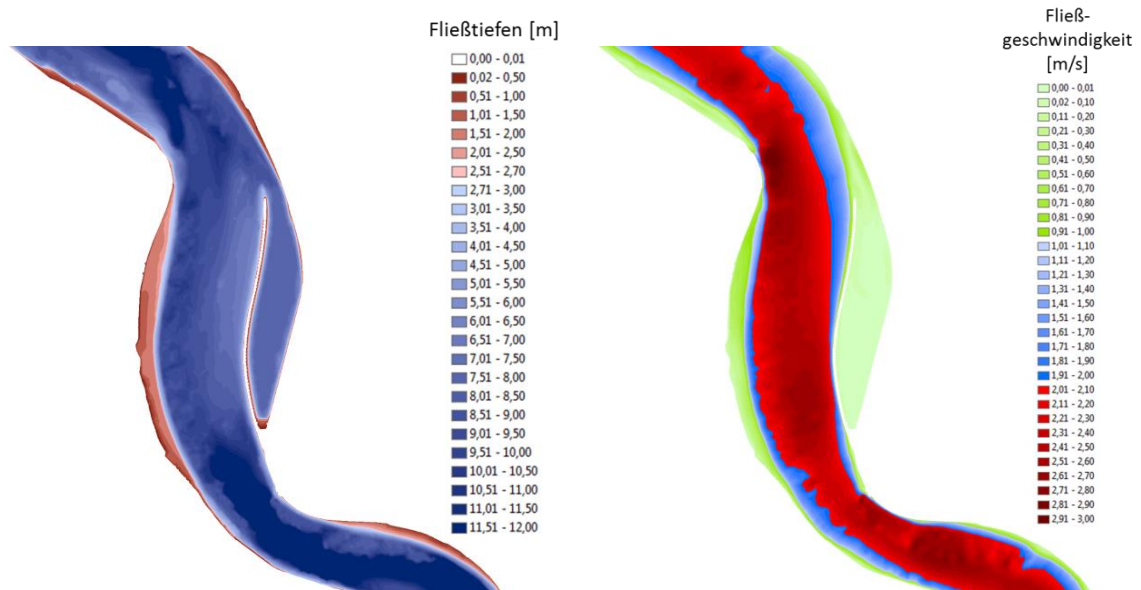


Abbildung 4-9: Exemplarische Darstellung der Fließtiefen (links) und Fließgeschwindigkeiten (rechts) aus einem 2D-HN-Modell bei einem Hochwasserabfluss

Exemplarisch wird anhand der gerasterten Strömungsinformationen bei einem Hochwasserabfluss die Potentialentwicklung anhand eines kleinen Flussabschnittes am Rhein im Bereich der Loreley getrennt für die Fließtiefen (siehe Abbildung 4-10) und Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 4-11) aufgezeigt. Je nach Parameter aus dem HN-Modell werden mehrstufige Verfahren für die Einzelpotentialentwicklung angewandt. Jede Rasterzelle muss zunächst mit den entsprechenden Parametern normiert und auf die Potentiallegende reklassifiziert werden. Mit der Normierung wird das Vergleichen von unterschiedlichen Daten bzw. Ergebnissen ermöglicht und eine vergleichbare Ebene geschaffen. Bei der Reklassifizierung werden die Werte in einem Raster neu zugeordnet und somit an die Potentiallegende angepasst.

Bei der Potentialentwicklung der Fließtiefen (siehe Abbildung 4-10) muss für die Normierung ein oberer Tiefenfreigabewert  $TFW$  festgelegt werden, bei dem bestmögliche Voraussetzungen für eine Befahrbarkeit vorliegen. Dies kann gemäß den Fahrrinnenanforderungen erfolgen oder spezifisch gemäß den Eigenschaften eines Binnenschiffes (Kapitel 4.3.3). Das Einzelpotential  $EP_{wd,j}$  aus der Strömungskenngröße Fließtiefe berechnet sich aus:

$$EP_{wd,j} = wd_j \cdot \frac{Pot_{max}}{TFW} \quad [4-3]$$

$EP_{wd,j}$	Einzelpotential des Parameters $wd$ (Fließtiefe) an der Stelle $j$ [-]
$wd_j$	Berechnete Fließtiefe aus dem HN-Modell an der Stelle $j$ [m]
$Pot_{max}$	Maximaler Potentialwert aus der Potentiallegende [-]
$TFW$	Tiefenfreigabewert [m]



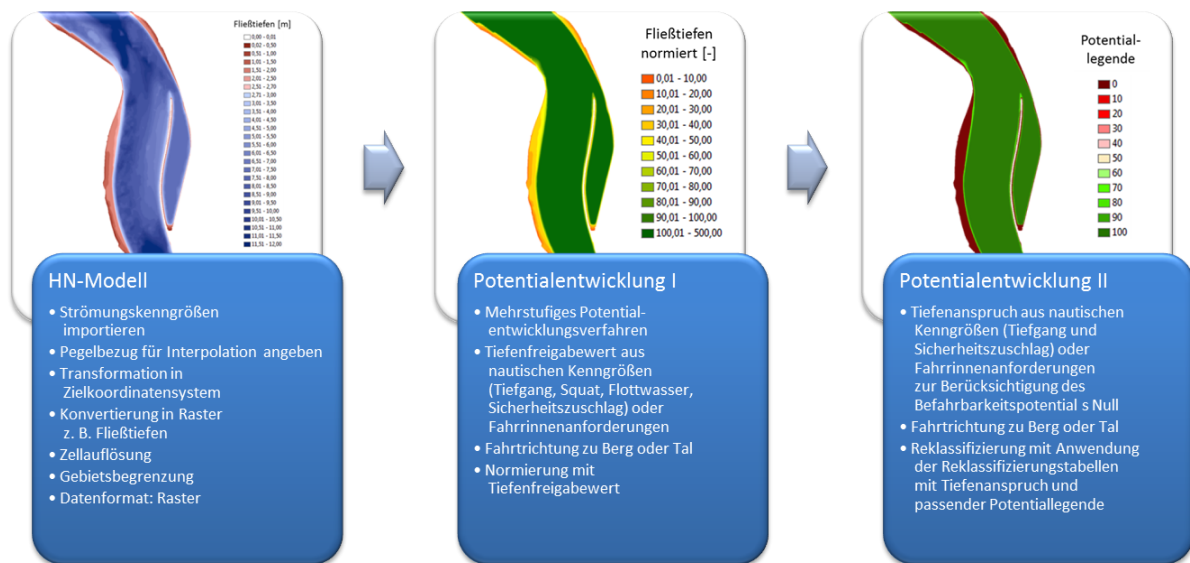


Abbildung 4-10: Exemplarische Potentialentwicklung der Fließtiefen aus dem HN-Modell mit einem oberen Tiefenfreigabewert von 5 m (Normierung) und einem Tiefenanspruch von 3 m (Reklassifizierung)

Im Beispiel (siehe Abbildung 4-10, mitte) wurde hier für die Normierung der Tiefenfreigabewert  $TFW$  auf 5 m festgelegt, d. h. für die Potentialentwicklung der Fließtiefen, dass ab einer Tiefe von 5 m bestmögliches Potential vorliegt. Der Tiefenfreigabewert wird aus der Summe folgender Größen getrennt für die Berg- bzw. Talfahrt abgeleitet:

- Tiefgang des Schiffes
- Squatabschätzung
- Flottwasser
- Sicherheitszuschläge

Des Weiteren muss ein Tiefenanspruch  $TA$  definiert werden, unterhalb dessen Grenze eine Befahrbarkeit nicht möglich ist ( $wd_j \leq TA$ ). Der Tiefenanspruch setzt sich mindestens aus dem Tiefgang (plus Sicherheitszuschläge) zusammen. Für das Einzelpotential  $EP_{wd,j}$  aus den Fließtiefen mit  $EP_{wd,j} \leq TA \cdot (Pot_{max}/TFW)$  gilt:

$$EP_{wd,j} = 0 \quad [4-4]$$

$EP_{wd,j}$	Einzelpotential des Parameters $wd$ (Fließtiefe) an der Stelle $j$ [-]
$TA$	Tiefenanspruch [m]
$Pot_{max}$	Maximaler Potentialwert aus der Potentiallegende [-]
$TFW$	Tiefenfreigabewert [m]

Im hiesigen Beispiel wurde der Tiefenanspruch  $TA$  exemplarisch auf 3 m (Tiefgang des Schiffes 2,70 m plus 30 cm Sicherheitszuschlag) festgelegt. In Abbildung 4-10 (rechts) entspricht dies somit den braunen Bereichen mit dem Befahrbarkeitspotential Null. Bei dem mehrstufigen Verfahren erfolgt die Reklassifizierung mit der Reklassifizierungstabelle der Kenngröße Fließtiefe (siehe Tabelle

4-4, links). Wenn die Potentialwertverteilung über die „verbleibenden“ Fließtiefen skaliert (Minimum bis Maximum) erfolgen soll, muss der Tiefenanspruch vom Fließtiefenraster abgezogen und der Tiefenanspruch bei der Einzelpotentialentwicklung auf Null gesetzt werden.

Bei der Potentialentwicklung der Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 4-11) muss zwischen Berg- und Talfahrt unterschieden werden. Die Talfahrer suchen in der Regel das schnellere Fahrwasser und die Bergfahrer eher stilleres Fahrwasser. Bei der Talfahrt muss die Geschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser größer Null sein, d. h. die Geschwindigkeit über Grund ist größer als die Strömungsgeschwindigkeit. Bei der Bergfahrt hingegen muss die Geschwindigkeit über Grund größer Null sein, d. h. die Fahrgeschwindigkeit ist größer als die Strömungsgeschwindigkeit. Das Einzelpotential  $EP_{v,j}$  aus der Strömungskenngröße Fließgeschwindigkeit berechnet sich aus:

$$EP_{v,j} = v_j \cdot \frac{Pot_{max}}{GG} \quad [4-5]$$

$EP_{v,j}$	Einzelpotential des Parameters $v$ (Fließgeschwindigkeit) an der Stelle $j$ [-]
$v_j$	Berechnete Fließgeschwindigkeit aus dem HN-Modell an der Stelle $j$ [m/s]
$Pot_{max}$	Maximaler Potentialwert aus der Potentiallegende [-]
$GG$	Geschwindigkeitsgrenze [m/s]

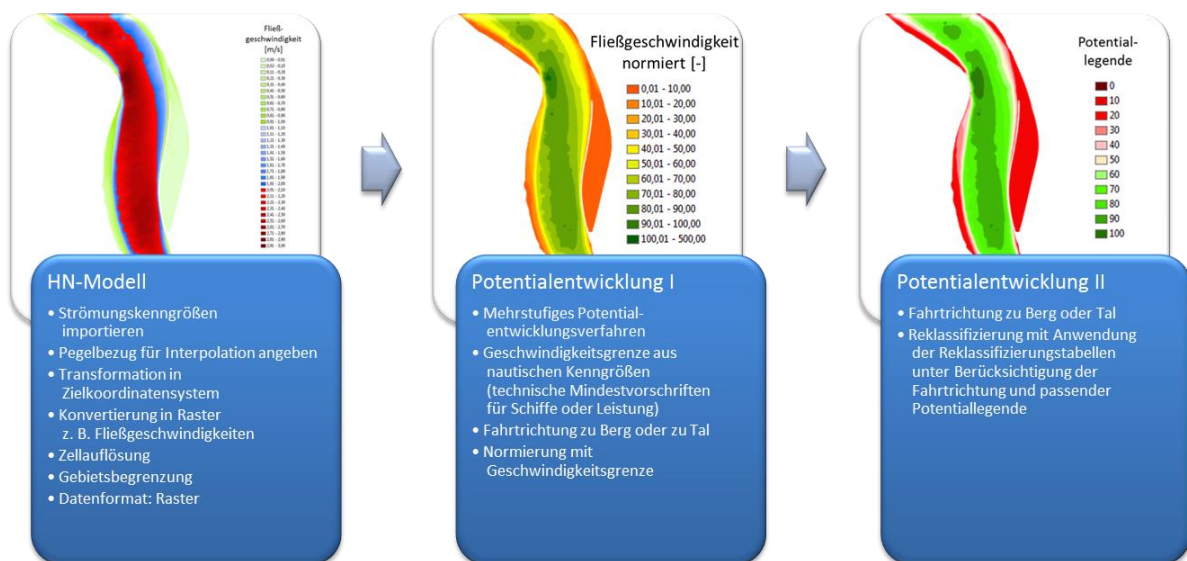


Abbildung 4-11: Exemplarische Potentialentwicklung der Fließgeschwindigkeiten aus dem HN-Modell mit einer Geschwindigkeitsgrenze von 2,8 m/s (10 km/h; Normierung) in der Talfahrt (Reklassifizierung)

Im hiesigen Beispiel wurde als Geschwindigkeitsgrenze ( $GG$ ) 2,8 m/s (10 km/h) gewählt, diese kann je nach Schiffstyp und Leistung festgelegt oder aus den technischen Mindestvorschriften für Schiffe bestimmt werden. Bei der Potentialentwicklung wird nach der Normierung der Fließgeschwindigkeiten das normierte Raster (siehe Abbildung 4-11, mitte) unter Berücksichtigung der Fahrtrichtung und der Potentiallegende reklassifiziert (siehe Abbildung 4-11, rechts). In der Regel handelt es sich bei der Berg- und Talfahrt um eine inverse Reklassifizierung wie die Abbildung 4-12 und die beiden



Reklassifizierungstabellen (siehe Tabelle 4-4, mitte und rechts) zeigen, da der Bergfahrer möglichst langsames Fahrwasser sucht, um schneller vorwärts zu kommen und umgekehrt. Aus Abbildung 4-12 (rechts) ist zu entnehmen, dass es für einen Bergfahrer bei diesem Abfluss Bereiche gibt, die nicht befahrbar sind (brauner Farbton, Null), da größere Strömungsgeschwindigkeiten als die vorgegebene Geschwindigkeitsgrenze existieren.

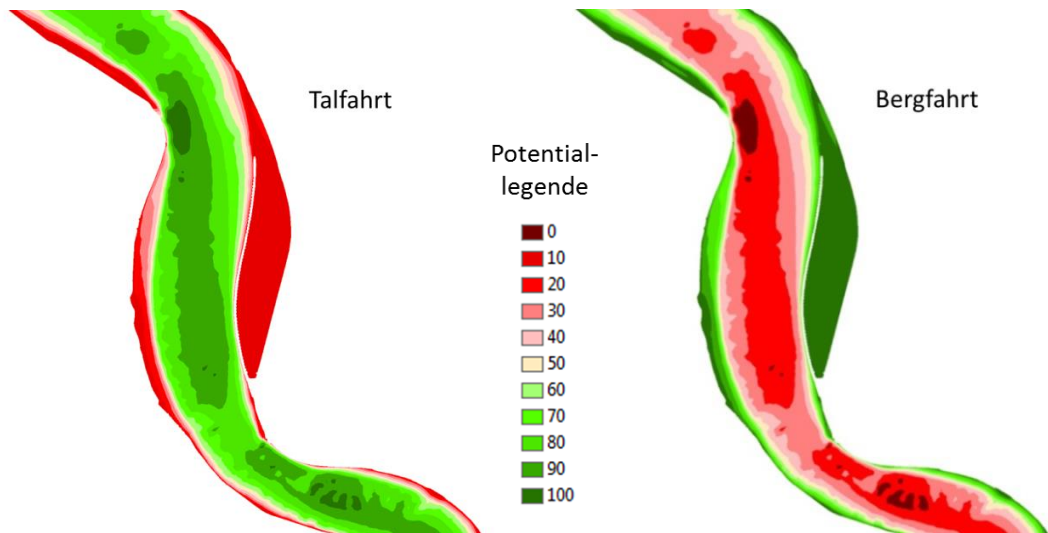


Abbildung 4-12: Gegenüberstellung der Einzelpotentialentwicklung der Fließgeschwindigkeit für die Tal- und Bergfahrt (Harlacher, 2016 [43])

Je nach Strömungskenngröße und Fahrtrichtung ist eine unterschiedliche Behandlung bei der Reklassifizierung erforderlich, da z. B. ein Schiff in Bereichen mit Wassertiefen kleiner als der Tiefgang plus Sicherheitszuschlag eindeutig nicht fahren kann und die Bereiche somit den Potentialwert Null erhalten. Hingegen werden in der Talfahrt bei dem Parameter der Strömungsgeschwindigkeit auch geringste Strömungsgeschwindigkeiten nicht mit dem Potentialwert Null ausgewiesen, da bezogen auf diesen Parameter ein Befahrbarkeitspotential dennoch möglich ist. Deshalb wurden bei dem mehrstufigen Potentialentwicklungsverfahren je nach Strömungskenngröße bzw. Fahrtrichtung verschiedene Reklassifizierungstabellen entwickelt (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Reklassifizierungstabellen (dynamisch) der mehrstufigen Potentialentwicklung (Strömungskenngrößen)

Reklassifizierungs-bereiche (von - bis)		Fließtiefe value = Tiefenanspruch * 100 / Tiefenfreigabe	Reklassifizierungs-bereiche (von - bis)		Fließgeschwindigkeit zu Tal & Andere	Reklassifizierungs-bereiche (von - bis)		Fließgeschwindigkeit zu Berg
-10 000	0	0	-10 000	0	0	-10 000	0	0
0	value	0	0	10	10	0	10	100
value	60	50	10	20	10	10	20	90
60	70	60	20	30	20	20	30	80
70	80	70	30	40	30	30	40	70
80	90	80	40	50	40	40	50	60
90	100	90	50	60	50	50	60	50
100	10 000	100	60	70	60	60	70	40
			70	80	70	70	80	30
			80	90	80	80	90	20
			90	100	90	90	100	10
			100	10 000	100	100	10 000	0
NoData		NoData	NoData		NoData	NoData		NoData

Denkbar ist es, aus weiteren Kenngrößen wie z. B. der Schubspannungsverteilung, aus Querströmungskomponenten, Wind oder Sichtbedingungen entsprechende Einzelpotentiale abzuleiten und je nach Fragestellung bei der Gesamtpotentialentwicklung mit zu berücksichtigen.

#### 4.4.2 Gesamtpotentialentwicklung

Die aus den Eingangsdaten gewählten Parameter wie z. B. Fließtiefen, Fließgeschwindigkeiten, nautische Informationen aus der Inland ENC und zusätzliche Informationen zur Berücksichtigung der Fahrregeln werden unter Berücksichtigung von Kenngrößen eines Binnenschiffes oder Fahrrinnenanforderungen in Einzelpotentiale  $EP_{ij}$  (Bearbeitungsebenen) überführt. Mit dem Index  $i$  ist der Bezug des Einzelpotentials zu der Kenngröße (z. B. Fließtiefen, Fließgeschwindigkeiten, Fahrrinne, Liegestelle, Tonne, Hochwasserregel) definiert und der Index  $j$  kennzeichnet die Stelle der Zelle im Rasterdatensatz des Untersuchungsgebietes.

Die Einzelpotentiale der Objekte aus der Inland ENC (Kapitel 4.4.1.1) werden nach dem konstanten oder distanzbasierten Potentialentwicklungsverfahren erzeugt und zuvor ggf. mit Sicherheitsabständen (z. B. bei der Umfahrung von Liegestellen oder Brückenpfeilern) beaufschlagt. Die Einzelpotentiale aus den Strömungskenngrößen (Kapitel 4.4.1.2) werden nach den mehrstufigen Potentialentwicklungsverfahren generiert.

Die Einzelpotentiale  $EP_{ij}$  (Bearbeitungsebenen) werden über Wichtungsfaktoren  $w_i$  zu Gesamtpotentialen  $GP_j$  (Ergebnisebene) vereint (siehe Abbildung 4-13) und stellt sich wie folgt in der Gleichung dar:

$$GP_j = \alpha \cdot \left( \sum w_i \cdot EP_{ij} \right) = \alpha \cdot (w_1 \cdot EP_{wd,j} + w_2 \cdot EP_{v,j} + \dots + w_i \cdot EP_{ij}) \quad [4-6]$$

$GP_j$	Gesamtpotential an der Stelle $j$ [-]
$EP_{ij}$	Einzelpotential der Kenngröße $i$ an der Stelle $j$ [-]
$w_i$	Wichtungsfaktor der Kenngröße $i$ [-]
$\alpha$	Koeffizient für Nullpotential [-]

Beschränkte (nicht befahrbare Bereiche) in den Bearbeitungsebenen müssen in der Ergebnisebene zwingend berücksichtigt werden (siehe Potentialwert 0 in Abbildung 4-13). D. h. der Koeffizient  $\alpha$  in Gleichung [4-6] ist 0, wenn ein Einzelpotential  $EP_{ij}$  an der Stelle  $j$  ein Befahrbarkeitspotential Null aufweist und  $\alpha$  ist gleich 1 für alle an der Stelle  $j$  betrachteten  $EP_{ij} > 0$  bei der Gesamtpotentialentwicklung.

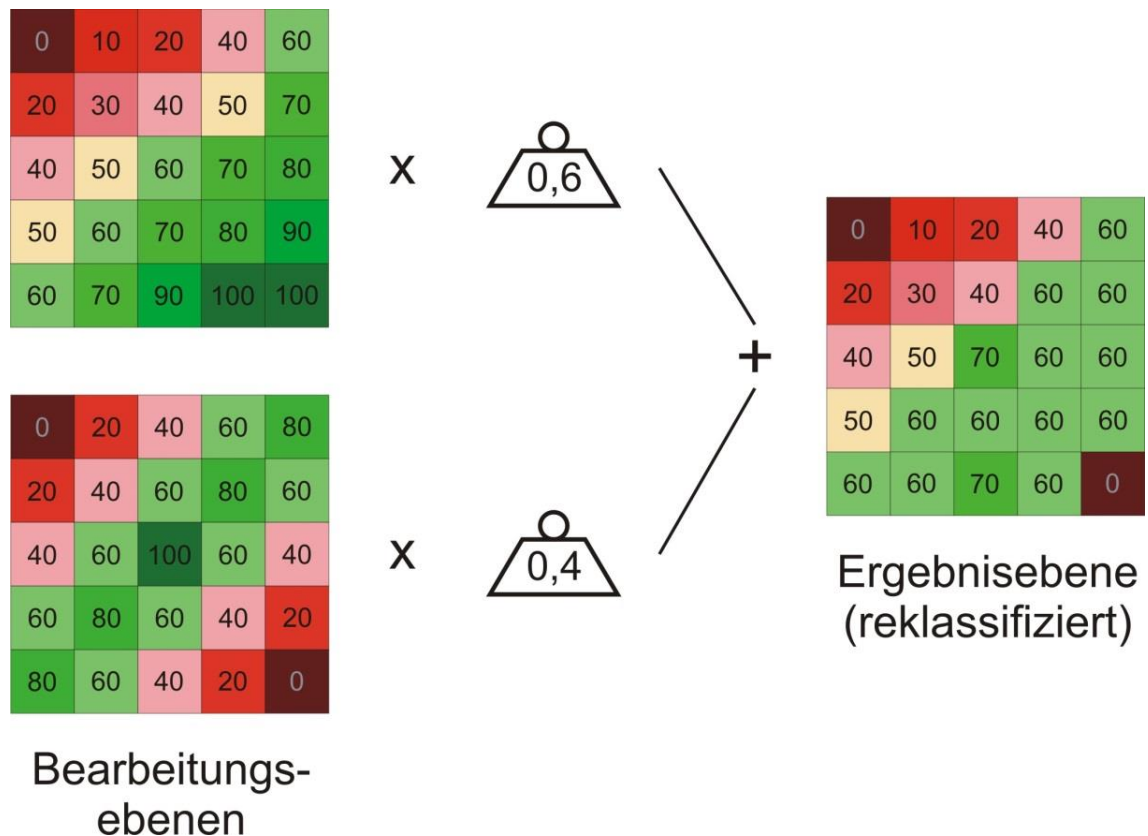


Abbildung 4-13: Exemplarische Gesamtpotentialentwicklung: Vertikale Superponierung gewichteter Bearbeitungsebenen und reklassifizierte Ergebnisebene mit Berücksichtigung beschränkter (nicht befahrbarer) Bereiche

Exemplarisch ist in Abbildung 4-14 zunächst die Gesamtpotentialentwicklung  $GP_j$  aus zwei gewichteten Einzelpotentialen (Fließtiefen  $EP_{wd,j}$  und Fließgeschwindigkeiten  $EP_{v,j}$ ) bei einer Talfahrt während eines Hochwasserabflusses an einem Beispiel dargestellt. Bei der Entwicklung der Gesamtpotentiale  $GP_j$  wurde beachtet, dass ein nicht befahrbares Einzelpotential bei der Summierung der gewichteten Anteile stets wieder ein nicht befahrbares Gesamtpotential bildet (siehe die eingeschränkten Bereiche der Fließtiefen in Abbildung 4-14, links). Diesem Fall wird in Gleichung [4-6] durch den Koeffizient  $\alpha = 0$  entsprochen. Bei der Potentialentwicklung wird zudem für das Gesamtpotential die kleinste Zellauflösung aus den kombinierten Einzelpotentialen zu Grunde gelegt.

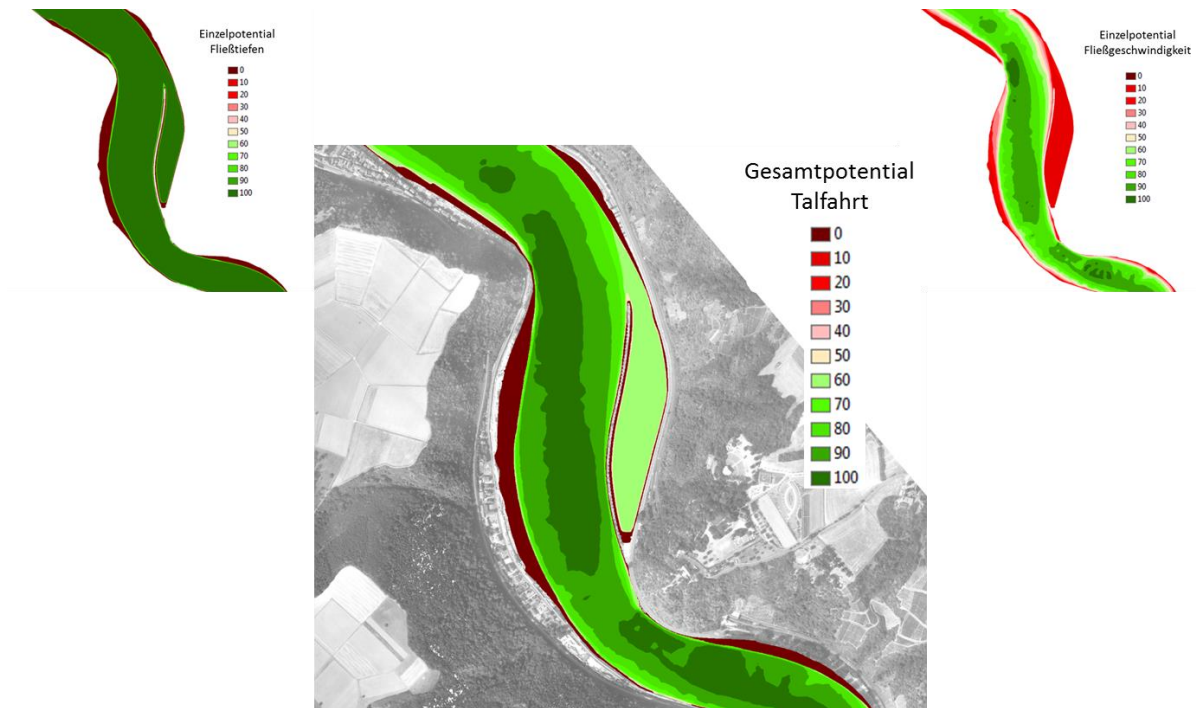


Abbildung 4-14: Exemplarische Darstellung der Gesamtpotentialentwicklung aus zwei gewichteten Strömungsinformationen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) bei der Talfahrt bei einem Hochwasserabfluss (Harlacher, 2016 [43])

Bei den Wichtungsfaktoren handelt es sich um Individualkomponenten, welche nicht pauschal für die jeweiligen Einzelpotentiale aus Fließgeschwindigkeit, Fließtiefe, Hochwasserregel etc. festgelegt werden können. Die Wichtungsfaktoren hängen u. a. von dem Einzelpotential selbst, aber auch von der Fragestellung (z. B. Tiefenengpässe), der Fahrtrichtung (Berg- oder Talfahrt) und dem Abfluss (Niedrig-, Mittel- oder Hochwasser) ab.

Bei einer reinen Analyse von Tiefenengpässen z. B. werden die Einzelpotentiale aus den Fließgeschwindigkeiten bei der Gesamtpotentialentwicklung nicht berücksichtigt. Hingegen ist für einen Bergfahrer, der eher stilleres Fahrwasser bevorzugt, die Wichtung des Einzelpotentials aus den Fließgeschwindigkeiten von größerer Bedeutung als für einen Talfahrer. Zudem kann das Einzelpotential aus den Fließtiefen bei einem Hochwasserabfluss weniger relevant sein als bei Niedrigwasser und abflussabhängig können ferner zusätzliche Verkehrsregeln (z. B. bei Hochwasser) hinzukommen.

Wichtig ist, dass z. B. bei einem Streckenvergleich oder einem Vergleich zweier aufgezeichneter Schiffsfahrten basierend auf dem berechneten Befahrbarkeitspotential die gleichen Wichtungsfaktoren einbezogen werden. Die Wichtungsfaktoren sind nicht als Kalibrierungsparameter des Verfahrens zu verstehen. Ein Gesamtpotential bietet eine Grundlage für die Bewertung eines Flussabschnittes, einer Fahrrinne oder aufgezeichneter bzw. simulierter Schiffsfahrten. Basierend auf diesem Vergleichsmedium können qualitative Aussagen getroffen und dabei gleichzeitig unterschiedliche Fachbereiche in Form von Einzelpotentialen berücksichtigt werden. Ähnlich wie bei den Strömungsmodellen (Kapitel 2.2.4) muss man auch hier zwischen absoluter und relativer Genauigkeit bei den Ergebnissen unterscheiden.

Abbildung 4-15 stellt die Fortführung der Gesamtpotentialentwicklung  $GP_j$  bei Hochwasser zu Tal dar, indem zusätzlich zu den Einzelpotentialen aus den Strömungsinformationen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) weitere Einzelpotentiale aus Objekten der elektronischen Navigationskarten (u. a. Fahrrinne, Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungsstonnen) und Verkehrsregeln berücksichtigt werden. Die Fahrrinne ist im Einzelpotential sehr gut befahrbar und auch in der Kombination mit den Strömungsinformationen ist der Fahrrinnenverlauf noch deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 4-15, links).

Besetzte Liegestellen und die Fahrrinnenbegrenzungsstonnen inklusive Sicherheitsabstände (hier: 5 m gewählt) sind in der Abbildung 4-15 (rechts) als nicht befahrbar (brauner Farbton) erkennbar. In dem Bewertungsverfahren *RiNA* können nicht befahrbare Potentiale durch reine Auswahl auch ohne die Angabe von Wichtungsfaktoren bei der Gesamtpotentialentwicklung berücksichtigt werden. Ergänzend wurde in Abbildung 4-15 (rechts) noch die Hochwasserregel aus der Rheinschiffahrts-polizeiverordnung beachtet, dass bei Wasserspiegellagen zwischen Hochwassermarke I und II in einem Richtpegelabschnitt, ein Talfahrer möglichst in der Mitte fahren soll (WSV, 2014 [86]). Die Hochwasserregel hebt sich in dem Gesamtpotential durch einen vergleichsweise höheren Potentialwert hervor.

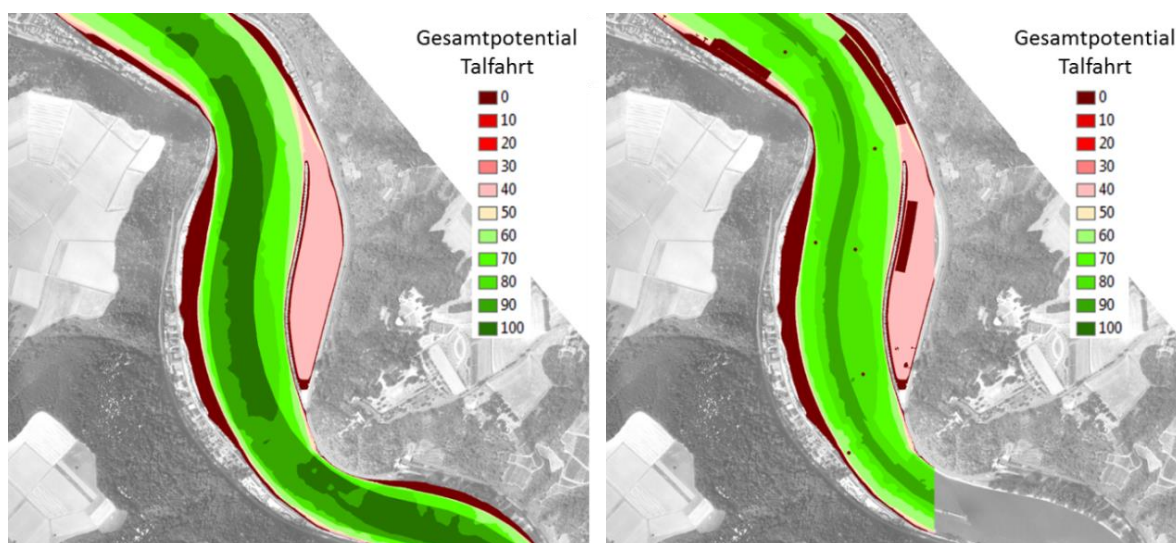


Abbildung 4-15: Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials bei Hochwasser zu Tal aus Strömungsinformationen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) und weiteren Objekten aus der Inland ENC: Zu den Strömungsinformationen wurde die Fahrrinne (links) und weitere Objekte (u. a. Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungsstonnen, Hochwasserregel) berücksichtigt (rechts)

Die Gesamtpotentiale werden nach der Wichtung der Einzelpotentiale und Berechnung gemäß Tabelle 4-5 reklassifiziert. Die Reklassifizierungstabelle bei der Gesamtpotentialentwicklung wird, analog wie bei den Tabellen aus der Einzelpotentialentwicklung, in dem Bewertungsverfahren *RiNA* dynamisch je nach verwendeter Potentiallegende und deren Diskretisierung erstellt. Ein entwickeltes Gesamtpotential ist gültig bei einem spezifischen Abfluss, nach definierten nautischen Kenngrößen des Bemessungsschiffes bzw. der Fahrrinne und Unterscheidung zwischen Berg- und Talfahrt.

Tabelle 4-5: Reklassifizierungstabelle (dynamisch) bei der Gesamtpotentialentwicklung

Reklassifizierungsbereiche (von - bis)		Gesamtpotentialentwicklung
-10 000	0	0
0	10	0
10	20	10
20	30	20
30	40	30
40	50	40
50	60	50
60	70	60
70	80	70
80	90	80
90	100	90
100	10 000	100
	NoData	NoData

Exemplarisch wurde in diesem Kapitel die Potentialentwicklung anhand eines Streckenabschnittes im Mittelrheintal im Bereich des Schutzhafens Loreley bei Rhein-km 555 vorgestellt. Die Potentialentwicklung soll jedoch nicht nur für kleinräumige Streckenabschnitte von wenigen Kilometern durchgeführt, sondern auch für großräumige Untersuchungen, wie in den beiden Fallstudien (Kapitel 5), ermöglicht werden. Bei der Wahl der Zellauflösung ist dies zu berücksichtigen.

### 4.5 Validierungsmethoden und Analysefunktionen des Verfahrens

Im Rahmen der Dissertation war zunächst angedacht, die Bahnkurven aus dem ARGO-Probebetrieb (Kapitel 3.2.2.4) für die Validierung des Bewertungsverfahrens *RiNA* zu verwenden. Mangels fehlender Informationen zu Driftwinkeln und Position der GPS-Antenne auf den Schiffen, erwiesen sich die Bahnkurven für einen detaillierten Vergleich als nicht geeignet. Daher wurde auf aktuelle Messdaten aufgezeichneter Schiffsfahrten zurückgegriffen, aus denen nicht nur die Bahnkurven sondern auch die Schiffsphasen abgeleitet werden können.

Grundlage für eine Validierung des Bewertungsverfahrens *RiNA* bilden aufgezeichnete Fahrten (Berg- und Talfahrt) von Binnenschiffen unterschiedlichen Typs (TMS - Tankmotorschiff, GMS - Gütermotorschiff, üGMS - überlanges Gütermotorschiff, SV - Schubverband), Abladetiefen und Abmessungen (Länge und Breite), bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser) auf dem Rhein mit seiner abwechslungsreichen Streckencharakteristik (Oberrhein mit Rheingau, Gebirgsstrecke im Mittelrhein sowie Niederrhein, Kapitel 5.1.5). Die Validierung und Analysefunktionen werden anhand zweier Fallstudien am Rhein in Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 aufgezeigt.

Bei den Großausführungsmessungen werden die Positionsdaten des Schiffes und die Richtung mittels GPS-Antennen und ggf. Kreiselkompass aufgezeichnet. Die Eckpunkte des Schiffskörpers werden meist in Gauß-Krüger-Koordinaten und einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde ausgegeben. Für die Validierung bzw. Auswertung der Potentiale müssen aus den Messdaten einzelne Schiffsphasen in Form eines „Flächen-Shapefiles“ gebildet werden. Hierfür wurde eine Workbench mit der Software



*FME (Feature Manipulating Engine)* entwickelt, welche diesen Prozess und die zeitliche Filterung (Anzahl der Phasen) übernimmt. Bei durchgeführten Simulationsfahrten an einem Binnenschiffsführungssimulator durch Schiffsführer bzw. Autopilot sind die Positionsdaten des Schiffes bekannt und müssen ggf. aus dem WGS84 in das gemeinsame Zielkoordinatensystem transformiert werden.

Abbildung 4-16 stellt exemplarisch vor dem Hintergrund digitaler Orthophotos mehrere aufgezeichnete Schiffsfahrten von Schubverbänden zu Berg (links) und zu Tal (rechts) im Bereich des Schutzhafens Loreley dar.

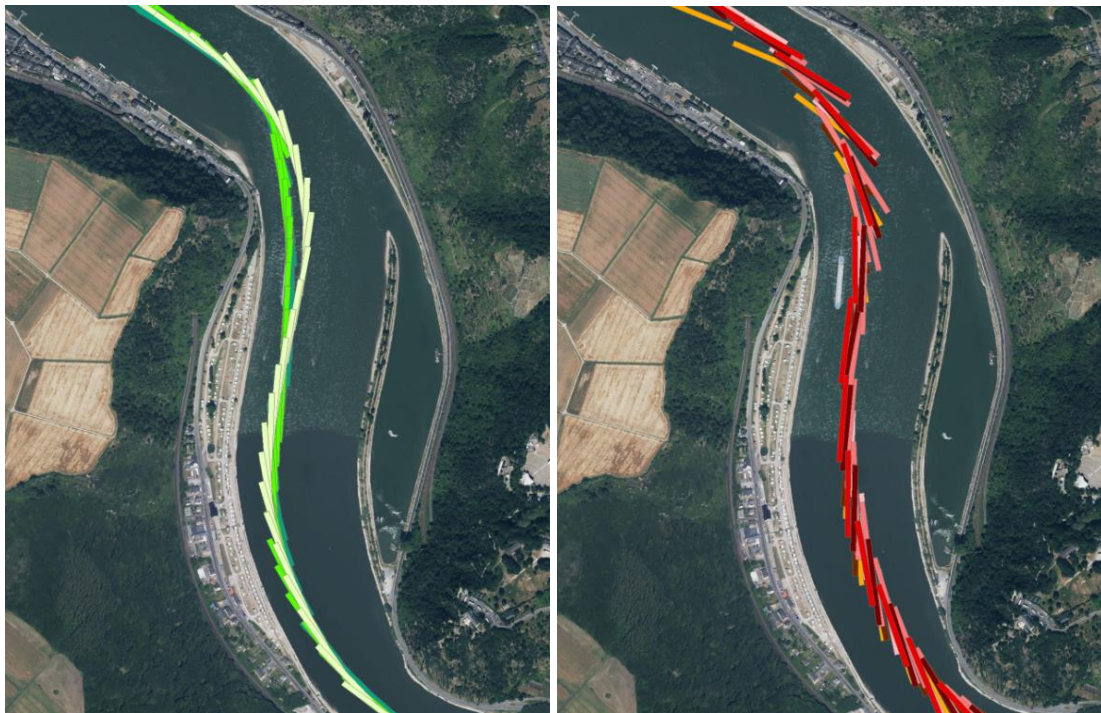


Abbildung 4-16: Darstellung der aufgezeichneten Schiffsfahrten von Schubverbänden (2SV, einreihig, zweigliedrig) zu Berg (links) und zu Tal (rechts) im Bereich des Schutzhafens Loreley bei Rhein-km 555

Die aufgezeichneten Schiffsfahrten können mit Geodaten kombiniert werden, so z. B. mit den elektronischen Navigationskarten (Inland ENC) sowie mit den im Rahmen des Bewertungsverfahrens entwickelten (Gesamt-) Potentialen (siehe Abbildung 4-17). Basierend auf der Lage der Schiffsfahrten kann eine erste Validierung durch einen visuellen Abgleich mit den Potentialen durchgeführt werden.

Eine objektive Validierung kann basierend auf jeder einzelnen Schiffsphase (Fläche des Schiffes zu einem bestimmten Zeitpunkt) durchgeführt werden, indem die Potentialwerte unter den Schiffesflächen statistisch ausgewertet werden (Zonenauswertung der Schiffssphasen). Hierbei werden statistische Kenngrößen wie Anzahl, Fläche, Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung u. a. berechnet. Die statistische Zonenauswertung kann für beliebige Parameter vorgenommen werden und ermöglicht so das schnelle Auffinden kritischer Bereiche (z. B. Identifikation von Engpassstellen).



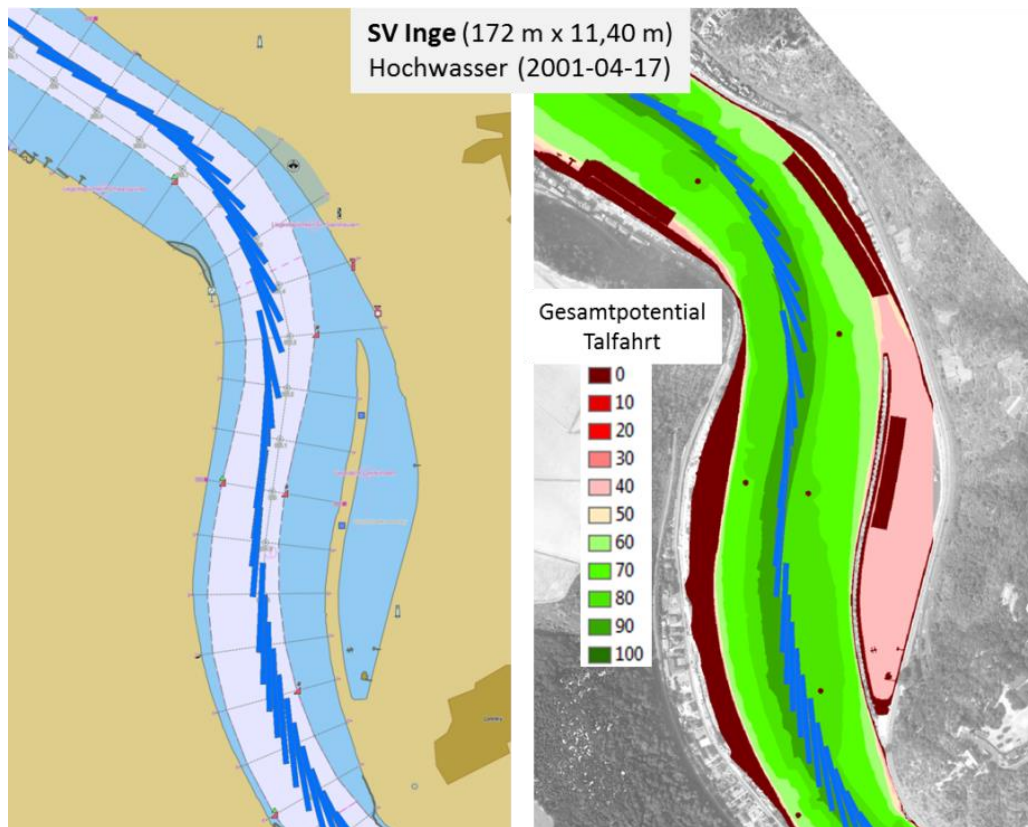


Abbildung 4-17: Überlagerung einer Talfahrt eines Schubverbandes bei Hochwasser mit der Inland ENC (links) und dem Gesamtpotential (rechts)

Die Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten an charakteristischen Fließgewässerabschnitten des Rheins zeigt, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen, die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen visualisiert und bewertet werden kann und das Verfahren *RiNA* mit der Kombination der Einzel- zu Gesamtpotentialen eingesetzt und zudem künftig für die Betrachtungen des ungestörten Verkehrs bei der Potentialentwicklung auch auf andere Fließgewässer angewendet werden kann. Zur Berücksichtigung des fließenden Verkehrs bei der Potentialentwicklung (z. B. Begegnung) wird empfohlen, aufgezeichnete Großausführungsmessungen aus dem zu betrachtenden Untersuchungsabschnitt einzubeziehen. Hier besteht Bedarf, die aus den Großausführungsmessungen abgeleitete Driftwinkel-Radiusbeziehung (Kapitel 5.3.4) je nach Schiffstyp und Fahrtrichtung hinsichtlich Abfluss, hydraulisch vergleichbaren Gewässerabschnitten und Vergleich unterschiedlicher Fließgewässerabschnitte weiter zu untersuchen, um eine Übertragbarkeit auf andere Gewässerabschnitte abzuleiten.

Des Weiteren können mit dem Verfahren Konturlinien berechnet (Kapitel 5.2.9) und Längs- bzw. Querschnitte basierend auf Rasterinformationen (hier z. B. ein Gesamtpotential) analysiert werden (siehe Abbildung 4-18). Basierend auf den Berechnungsergebnissen eines Gesamtpotentials können benutzerdefiniert die Potentiale „größer als“ festgelegt und mittels Achsdiskretisierungslinien ein Entwurf einer Basisleitlinie konstruiert werden, welche den potentiellen Fahrweg vorgibt (Kapitel 5.3.3). Diese Leitlinie kann über eine Schnittstelle in einen Binnenschiffsführungssimulator integriert und von einem Schiffsführer oder mittels einer automatischen Bahnführung nachgefahren werden. Alternativ kann vorab die Basisleitlinie innerhalb *ArcGIS* bzw. der *FME* optimiert und mittels

eines entwickelten *FME*-Workflows z. B. die Schiffsphasen, die Schleppfläche und die Fahrspurbreiten eines Schiffes abgeschätzt werden (Kapitel 5.3.5).

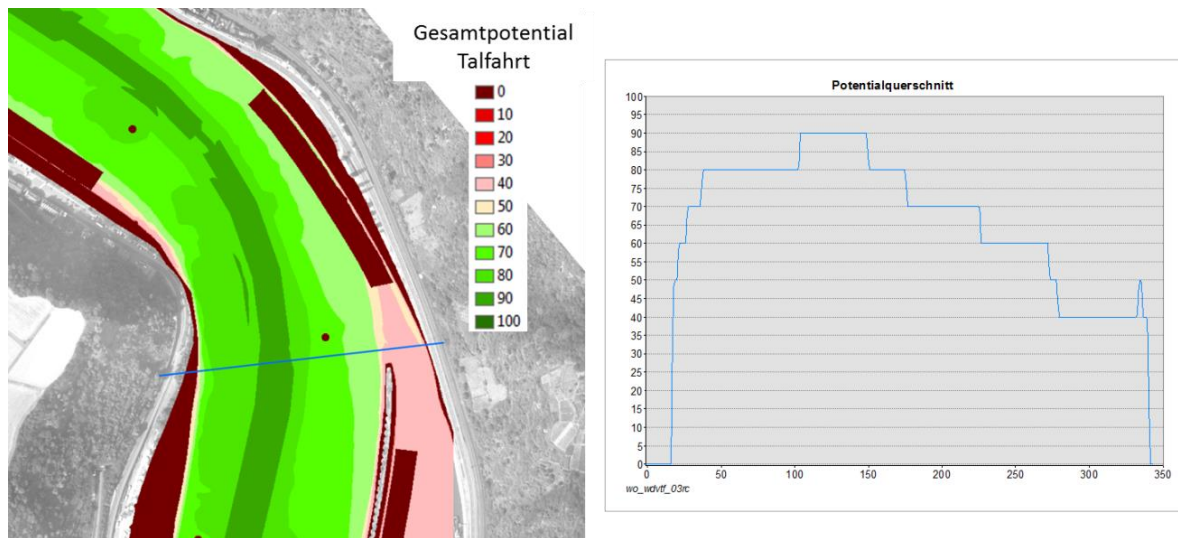


Abbildung 4-18: Befahrbarkeitspotential zu Tal (links) aus Strömungsinformationen, nautischen Informationen aus der Inland ENC und ergänzend wurden die Beschränkungen der Schifffahrt bei Hochwasser nach der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV § 10.01) berücksichtigt; Potentialquerschnittsverlauf entlang der blauen Linie (rechts)

## 4.6 Softwaresystem *RiNA*

Das im Rahmen der Dissertation entwickelte Bewertungsverfahren *RiNA* leistet einen wesentlichen Beitrag zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen. Die Beschreibung und Ziele des Bewertungsverfahrens *RiNA* wurden bereits in Kapitel 4.1 eingehend erläutert. Die Aufbereitung, Verarbeitung und Kombination der unterschiedlichen, interdisziplinären Eingangsdaten sowie der Berechnungsprozess und die Analyse der Ergebnisse sind äußerst aufwändig. Die Kombination der Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten mit den Kenngrößen eines Binnenschiffes (Schiffstyp, Tiefgang, Geschwindigkeit) bzw. mit allgemeinen Vorgaben (z. B. technische Mindestgeschwindigkeit, abflussabhängig freigegebene Fließtiefe, Unterscheidung zwischen Berg- und Talfahrt, verschiedene Abflusszustände und ggf. geometrische Varianten, Inland ENC Objekte, Verkehrsregeln etc.), ergibt schnell eine Vielzahl an Untersuchungsszenarien, die ohne Softwareunterstützung nicht durchführbar wären.

### 4.6.1 Umsetzung und Architektur

Die Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* für den ungestörten Verkehr bei stationärem Abfluss wurde anhand eines Pilotstreckenabschnittes am Rhein entwickelt und in eine nutzerangepasste Softwareentwicklung überführt. Dies ermöglicht zudem weiteren Anwendern den Zugang zu diesem Bewertungsverfahren und somit Potential zur Weiterentwicklung bzw. Ausdehnung auf weitere Anwendungsbereiche. Die programmtechnische Umsetzung von *RiNA* wurde von einem Softwareunternehmen (FZI – Forschungszentrum Informatik) geleistet. Neben den inhaltlichen

Vorgaben für die Programmierung waren die fachliche Begleitung und zahlreiche Tests und schließlich die Abnahme des Softwaresystems wesentliche Aufgaben bei der Umsetzung des Verfahrens in eine Softwareentwicklung. Abbildung 4-19 beschreibt die Hauptbereiche „Konzeption“, „Umsetzung“, „Testphase / Abnahme“ sowie „Betrieb und Ausblick“ des entwickelten Bewertungsverfahrens *RiNA* und stellt farblich abgestuft die Anteile der Eigen-, Fremd- und kombinierten Leistung mit dem Softwareentwicklungsunternehmen dar.

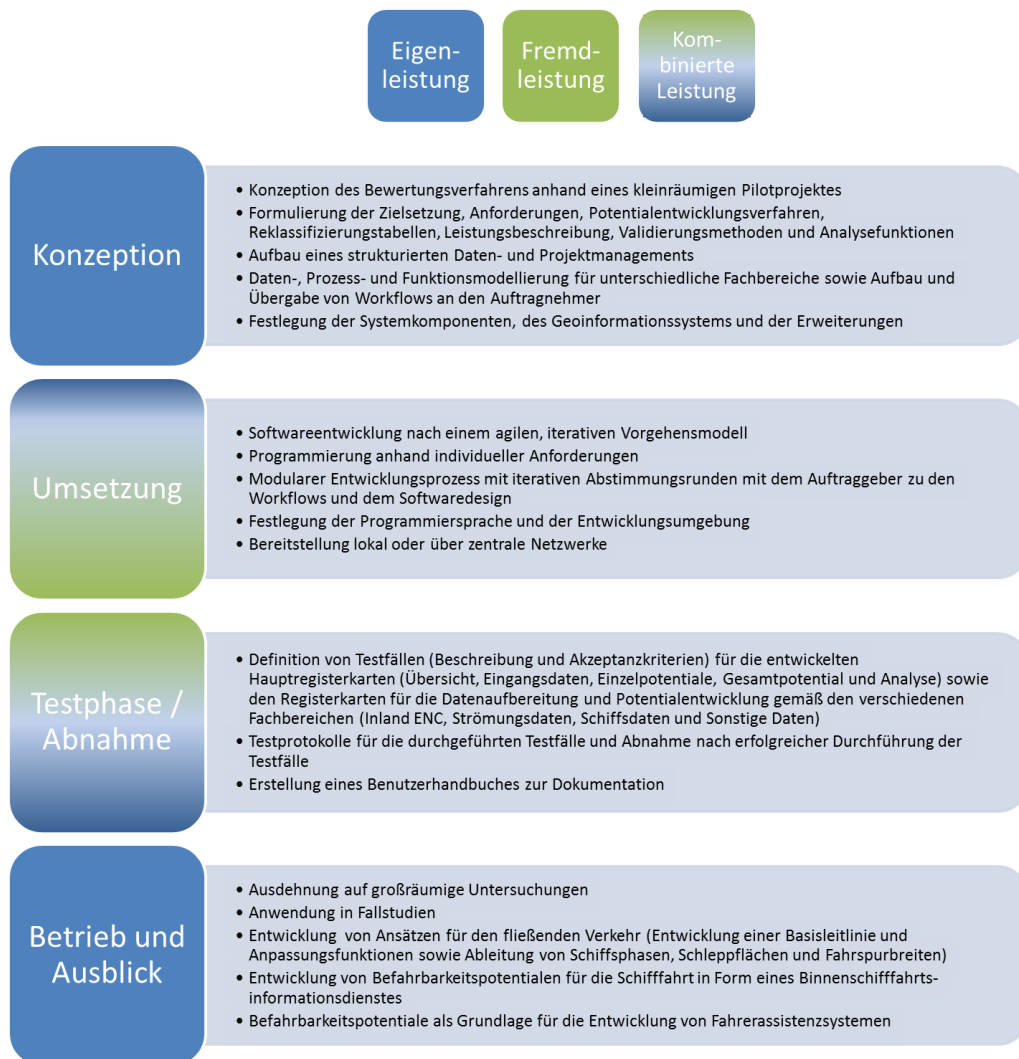


Abbildung 4-19: Schema zur Darstellung der Eigen-, Fremd- und kombinierten Leistung bei der Entwicklung des Bewertungsverfahrens *RiNA* bzw. der Software

Für die Softwareentwicklung wurde ein agiles Vorgehensmodell (siehe Abbildung 4-20) gewählt, um während des Entwicklungsprozesses in iterativen Abstimmungsrunden mit dem Softwareentwicklungsunternehmen, ausreichend Raum für die schöpferische Leistung und Gestaltung des Softwaresystems offen zu halten. Es wurde zeitnah Einfluss auf die anwendungsfreundliche Gestaltung bzw. Konzeption der Software, die Struktur zum Daten- bzw. Projektmanagement, das Speicherkonzept, die Namensvergabe und die Praxistauglichkeit genommen. Insbesondere die Zusammenarbeit mit dem Entwicklungsteam, die Bereitstellung der modular aufgebauten Software in kurzen Zyklen und die Möglichkeit auf Veränderungen und Erfahrungen rasch reagieren zu können,

trugen zu einem positiven Ergebnis bei. Diese iterative Entwicklungsweise erwies sich für die Erstellung eines derartigen Softwaresystems, wie es das Verfahren *RiNA* darstellt, als zielführend.

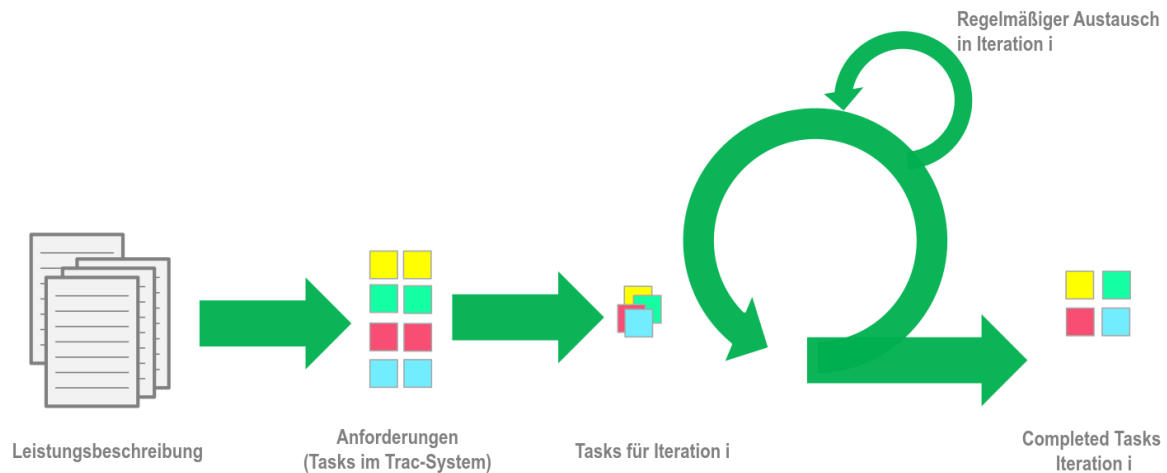


Abbildung 4-20: Agiles Vorgehensmodell bei der Softwareentwicklung (FZI, 2015 [34])

Für eine geeignete Zusammenführung und Kombination der unterschiedlichen Eingangsdaten aus den interdisziplinären Fachbereichen, müssen diese in ein gemeinsames System integriert werden. Hierfür wurde aufgrund der verschiedenen Datenformate ein Geoinformationssystem (GIS) als Basis für die Entwicklung gewählt (Kapitel 4.3). Die Softwareentwicklung *RiNA* wurde als Erweiterung bzw. sogenanntes *AddIn* für das weltweit verbreitete und anerkannte Geoinformationssystem *ArcGIS* des Unternehmens *ESRI* konzipiert. Somit kann *RiNA* als Fachschale u. a. das Inhaltsverzeichnis, die Visualisierungsoberfläche und bereits bestehende Funktionen und Werkzeuge von *ArcGIS* verwenden. Diese Funktionen und Werkzeuge müssen nicht in einer eigenständigen Entwicklung neu bzw. zusätzlich umgesetzt werden. Die Verteilung bzw. Bereitstellung des *RiNA-AddIn* kann lokal oder über zentrale Netzwerke bereitgestellt werden.

Die Ermittlung der Befahrbarkeit einer Binnenwasserstraße besteht aus mehreren, z. T. aufeinander aufbauenden Workflows, Arbeitsschritten, Berechnungen und Transformationen unter Verwendung bislang verschiedener Programmsysteme. Mit der Entwicklung des Softwaresystems *RiNA* werden alle Prozesse innerhalb des Programmsystems *ArcGIS* ausgeführt und die zahlreichen erforderlichen Zwischenschritte bis zur Potentialentwicklung laufen für den Benutzer z. T. im Hintergrund ab.

In Abbildung 4-21 sind die Architekturkomponenten von *RiNA* dargestellt. Innerhalb eines *RiNA*-Projekts laufen die Komponenten Eingangsdaten, Einzelpotentiale und Gesamtpotential sowie Analysefunktionen zusammen bzw. sind vernetzt. Das Herzstück von *RiNA* ist die Kopplung und Interaktion mit dem Programmsystem *ArcGIS*. In *RiNA* werden verschiedene Eingangsdaten bzw. Datentypen verarbeitet, konvertiert und transformiert. Aus den selektierten Eingangsdaten werden nach benutzergesteuerten Vorgaben Einzelpotentiale generiert und daraus Gesamtpotentiale entwickelt. Für die Auswertung und Beurteilung stehen verschiedene Analysewerkzeuge und Exportfunktionalitäten zur Verfügung.

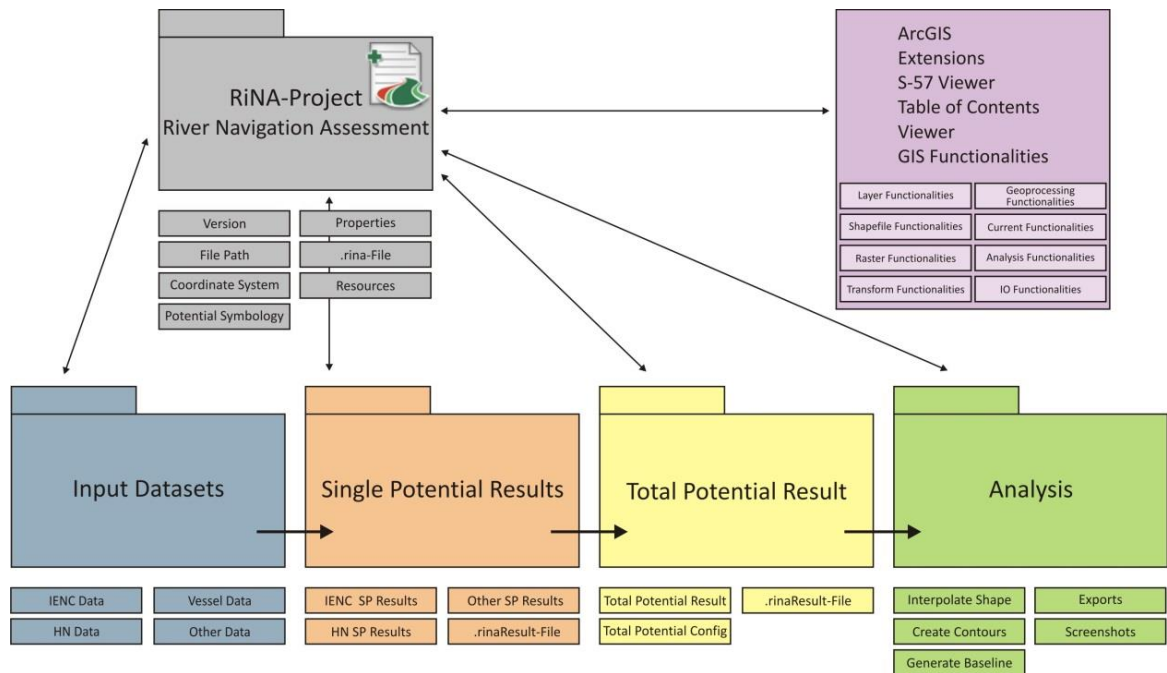


Abbildung 4-21: Architekturkomponenten von *RiNA* (verändert nach FZI, 2015 [34])

Eine Befahrbarkeitsanalyse erstreckt sich meist über mehrere Sitzungen. Abbildung 4-22 stellt eine Übersicht des allgemeinen Workflows innerhalb *RiNA* dar und visualisiert - je nach Projektstand - die Zugriffsmöglichkeiten.

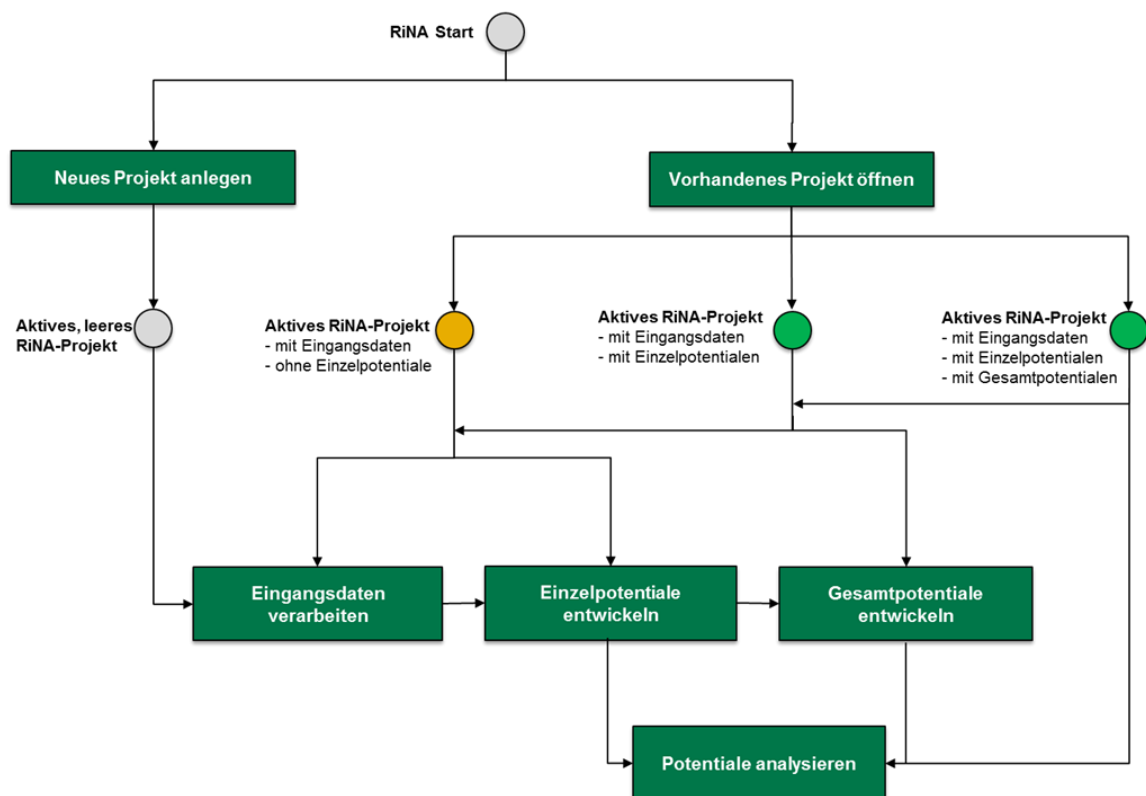


Abbildung 4-22: Allgemeiner Workflow in *RiNA* (Übersicht) (FZI, 2016 [35])



Der Aufbau einer Projektstruktur und eines Öffnen- bzw. Speichern-Konzeptes ermöglicht die Wiederverwendung bzw. den Austausch von Ergebnissen mit anderen Benutzern. Hierfür ist eine Konfigurationsdatei (\*.rina) erforderlich, welche die Struktur widerspiegelt und weitere Projekteinstellungen (z. B. Zielkoordinatensystem, Potentiallegenden) dokumentiert (siehe Abbildung 4-23). In Ergänzung werden die getroffenen Parametereinstellungen und Ausgangsdatensätze bei der Entwicklung der Einzel- bzw. Gesamtpotentiale in Ergebnisdateien (\*.rinaResult) festgehalten. Ein zusätzliches Ampelsystem veranschaulicht den Bearbeitungszustand einzelner Datenobjekte und signalisiert z. B. mit der Farbe Grün, dass das Objekt für den nächsten Schritt im Workflow vorbereitet ist.



```
<?xml version="1.0"?>
<RiNAFile xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <RiNAVersion>1.0</RiNAVersion>
  <ProjectName>MR5-10m</ProjectName>
  <ProjectWorkspaceRoot>F:\MR\ProjectWorkspaceRoot</ProjectWorkspaceRoot>
  <created>2016-03-09T09:02:33.1792866+01:00</created>
  <lastModified>2016-03-11T15:35:59.7727105+01:00</lastModified>
  <PotentialLegendPath>F:\MR\Projects\MR5-10m\4_resources\symbology\Leg_Pot_EW_11cl_0-100_10.lyr</PotentialLegendPath>
  <PotentialClassifiedLegendPath>F:\MR\Projects\MR5-10m\4_resources\symbology\Leg_Pot_klassifiziert_11cl_0-100_10.lyr</PotentialClassifiedLegendPath>
  <CoordinateSystemCode>31467</CoordinateSystemCode>
  <EvalScaleLowerLimit>0</EvalScaleLowerLimit>
  <EvalScaleHigherLimit>100</EvalScaleHigherLimit>
  <EvalScaleStepsBy>10</EvalScaleStepsBy>
  <InputData>
    <IENC_Maps>
    </IENC_Maps>
    <IENC_Data>
    </IENC_Data>
    <HNC_Data>
    </HNC_Data>
    <Misc_Shapefiles />
    <Misc_Raster />
  </InputData>
  <SinglePotentials>
  </SinglePotentials>
  <TotalPotentials>
  </TotalPotentials>
</RiNAFile>
```

Abbildung 4-23: Auszug aus der Konfigurationsdatei von RiNA

Im Benutzerhandbuch sind weitere Informationen und Erläuterungen zu dem entwickelten Bewertungsverfahren RiNA dokumentiert (FZI, 2016 [35]).

### 4.6.2 Aufbau und Struktur

RiNA wurde als sogenannte Fachschale in ArcGIS entwickelt. Über den AddIn-Manager kann das Programm in ArcGIS integriert werden. RiNA wurde als andockbares Fenster umgesetzt und besteht aus fünf Hauptregisterkarten, die wie folgt in Übersicht, Eingangsdaten, Einzelpotentiale, Gesamtpotential und Analyse (siehe Abbildung 4-24) unterteilt sind. Die Struktur der Registerkarten spiegelt sowohl die Architekturkomponenten als auch die Dateistruktur sowie die Layerstruktur im Inhaltsverzeichnis wieder (siehe Abbildung 4-25). Die Datenablage erfolgt ordner- bzw. dateibasiert getrennt in den jeweiligen Projektordnern. Diese strukturelle Ähnlichkeit erleichtert die Bedienbarkeit des Programmes und verbessert das Programmverständnis.

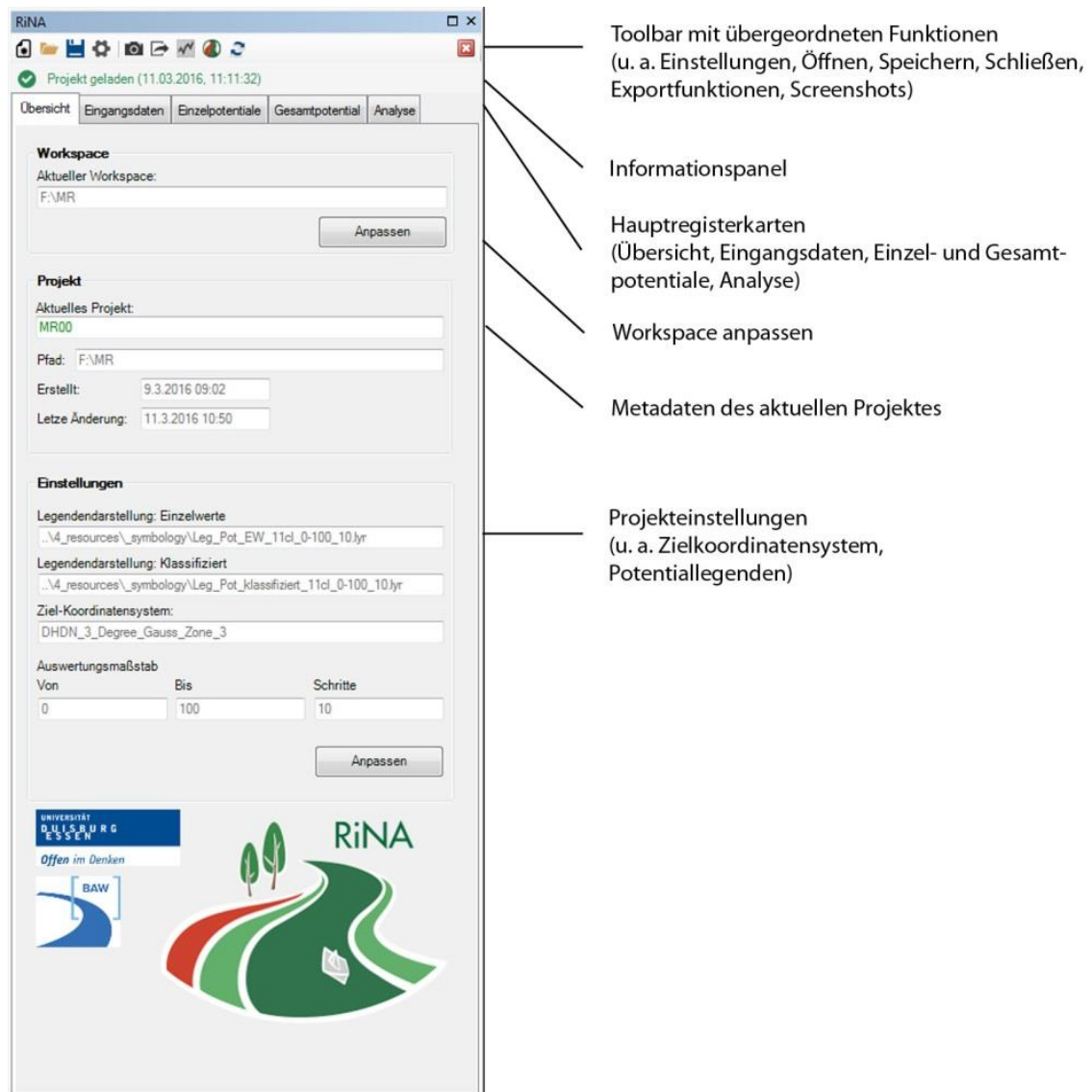


Abbildung 4-24: Aufbau des RiNA-AddIn mit der Hauptregisterkarte *Übersicht*

In der Registerkarte *Übersicht* werden Projekteinstellungen, wie Projektname, Pfad, die Definition des Zielkoordinatensystem und die zu verwendende Potentiallegende festgelegt. Globale Funktionen wie neues Projekt anlegen, öffnen, speichern, schließen, Einstellungen, Exportfunktionalitäten und Gesamtpotential laden, sind in der Toolbarleiste als Schnellzugriff angeordnet. Des Weiteren wurde unter der Toolbarleiste mit den übergeordneten Schnellzugriffsfunktionen eine sogenannte Feedbackleiste in Form eines Informationspanels eingeführt, welche dem Benutzer bei der Durchführung einzelner Berechnungsschritte stets Rückmeldung und Auskunft über den Programmstatus bzw. den Berechnungsfortschritt gibt. Die Oberflächen sind in deutscher Sprache umgesetzt, aber eine Mehrsprachigkeit ist vorbereitet.



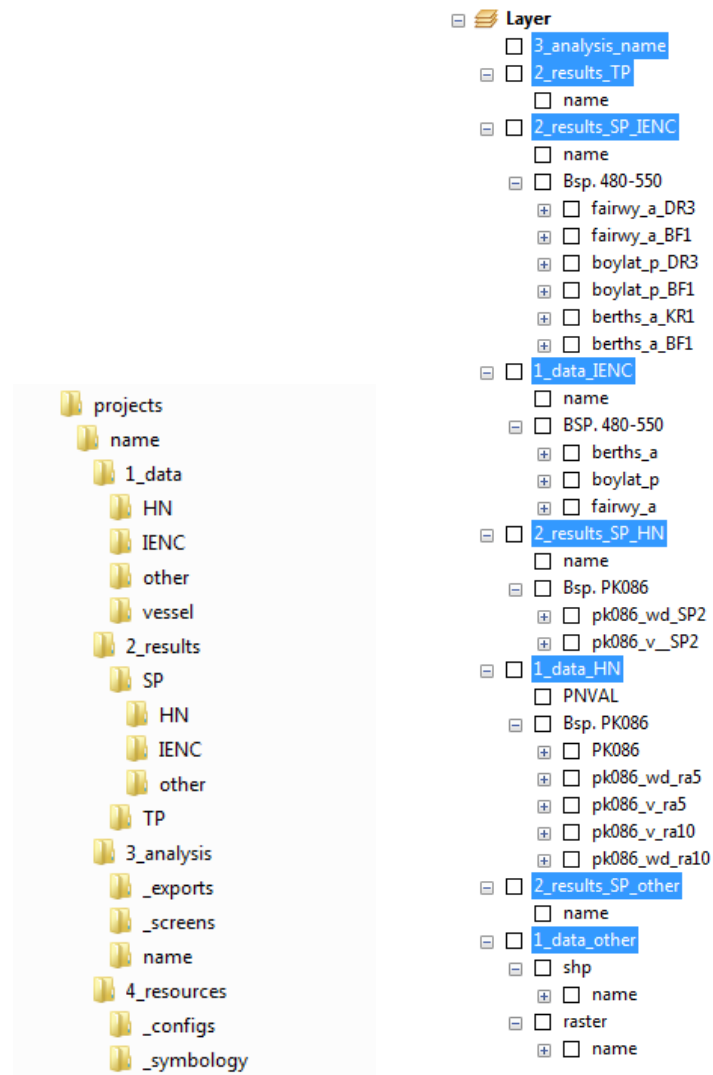


Abbildung 4-25: Aufbau einer Projektstruktur zur Ablage der Daten bzw. Ergebnisse (links) und als vorgegebene Layerstruktur im Inhaltsverzeichnis von ArcGIS (rechts)

Die Hauptregisterkarte *Eingangsdaten* ist in vier weitere Registerkarten (*IENC-Karten*, *Strömungsdaten*, *Schiffsdaten* und *Sonstige Daten*, siehe Abbildung 4-26, links) unterteilt. Über diese Registerkarten werden die Eingangsdaten in *RiNA* eingeladen, importiert, transformiert, selektiert und aufbereitet bzw. verarbeitet sowie für die Potentialentwicklung vorbereitet.

Die Hauptregisterkarte *Einzelpotentiale* besteht aus drei weiteren Registerkarten (*IENC-Karten*, *Strömungsdaten* und *Sonstige Daten*, siehe Abbildung 4-26, mitte). Die unter *Eingangsdaten* selektierten und bearbeiteten Daten werden in den entsprechenden Registerkarten der *Einzelpotentiale* zur Auswahl und weiteren Verarbeitung angezeigt. In diesen Registerkarten wird die Potentialentwicklung nach den verschiedenen Verfahren durchgeführt. Hierbei stehen je nach Objekt bzw. Parameter verschiedene Verfahren der Potentialentwicklung zur Verfügung (Kapitel 4.4.1).

Die entwickelten Einzelpotentiale können benutzergesteuert in die nächste Registerkarte *Gesamtpotential* (siehe Abbildung 4-26, rechts) übertragen werden. In dieser Registerkarte werden die Einzelpotentiale aus den verschiedenen Bereichen ausgewählt, Wichtungsfaktoren und Name für die Gesamtpotentialentwicklung (Kapitel 4.4.2) vergeben.

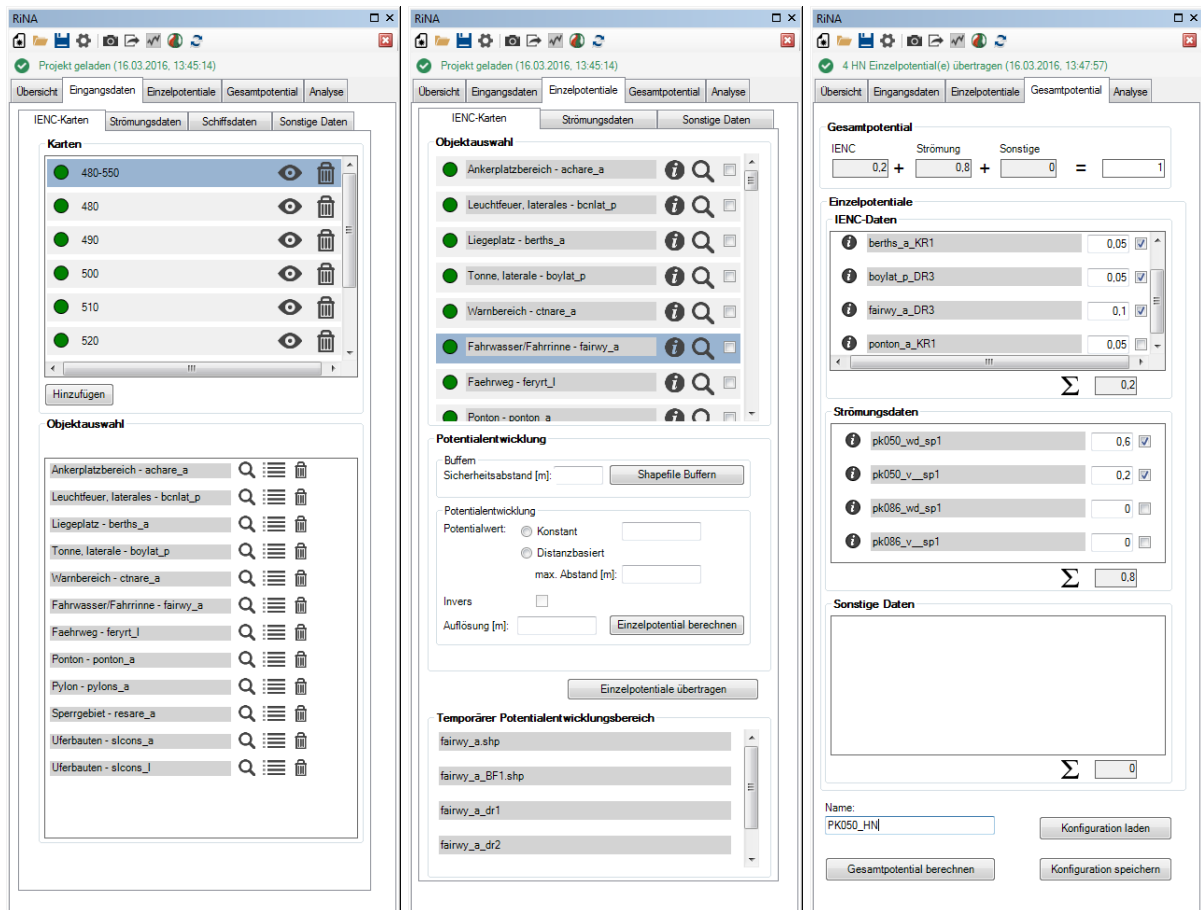


Abbildung 4-26: Aufbau von RiNA mit der Hauptregisterkarte *Eingangsdaten* (links), *Einzelpotentiale* (mitte) und *Gesamtpotentiale* (rechts)

In der Hauptregisterkarte *Analyse* sind die Auswertefunktionen zusammengefasst (siehe Abbildung 4-27). Voraussetzung ist die Auswahl eines Rasterlayers als Eingabe-Layer. Basierend auf dem ausgewählten Eingabe-Rasterlayer können „Punkt- oder Linien-Shapefiles“ interpoliert, zonale statistische Auswertungen mit „Flächen-Shapefiles“ durchgeführt, Konturlinien erstellt oder Basisleitlinien generiert werden. Unterschiedliche Export- und Darstellungsfunktionalitäten runden die Funktionen der Hauptregisterkarte *Analyse* ab.

The screenshot displays the 'Analyse' tab of the RiNA software. It features several configuration sections: 'Eingabe-Layer' with a dropdown menu showing 'PK050\_HN\_TP2'; 'Ausgabe-Layer' with a dropdown menu showing 'PK050\_HN\_TP2\_ZNS'; 'Konturlinie erstellen' with an 'Intervall [m]:' field set to '10' and a 'Konturlinie erstellen' button; 'Shape interpolieren' with an 'Eingabe-Shape' dropdown set to 'T1\_2SV\_Vero\_13\_01\_2012\_490\_560', radio buttons for 'Punkt-Shapes', 'Linien-Shapes', and 'Flächen-Shapes' (the last of which is selected), a 'Zonen-Feld' dropdown set to 'DATKOM', and a 'Shape interpolieren' button; and 'Basisleitlinie' with an 'Achsdiskretisierungslinien' dropdown set to 'Achsdiskretisierung\_50m', a 'Basispunkt-Position auf dem Profil' slider set to '0.5', a 'Untere Grenze' dropdown set to '60', and a 'Basisleitlinie berechnen' button.

Abbildung 4-27: Aufbau von RiNA mit der Hauptregisterkarte *Analyse*

### 4.6.3 Berechnungssteuerung und Visualisierung

Die in RiNA produzierten Berechnungsergebnisse werden direkt im Inhaltsverzeichnis gelistet und im Ansichtsfenster des Programmsystems ArcGIS dargestellt und können dort mit georeferenzierten Daten (z. B. Orthophotos, topographische Karten, Inland ENC etc.) überlagert werden (siehe Abbildung 4-28). Neben der Berechnungssteuerung ist die Ergebnisvisualisierung bzw. -überlagerung ein wichtiger Aspekt des Bewertungsverfahrens. Die wesentlichen Darstellungsmöglichkeiten sind die Vektordarstellung (Punkt, Linie oder Fläche) und die Rasterdarstellung. Die Darstellung von Längs- und Querschnitten erfolgt je nach Datentyp alternativ in einer Diagrammansicht oder mittels (Attribut-) Tabellen. Zusätzlich stehen Exportfunktionalitäten mit unterschiedlichen Datenformaten (txt, xlsx, jpg) zur Verfügung. Die Berechnungsergebnisse selbst werden in gängigen Geodatenformaten (Vektor- und Rasterdaten) gespeichert, sodass eine Schnittstelle und Visualisierung mit anderen Programmen ermöglicht wird.

Die Festlegung der Zellauflösung ermöglicht dem Benutzer sowohl klein- als auch großräumige Projektgebiete (Dezikelometer) zu untersuchen. Je kleiner die Zellauflösung gewählt wird, desto

größer ist die erzeugte Datenmenge und desto länger dauert der Berechnungsprozess. Bei Fragestellungen in denen Sicherheitsabstände u. a. um Brückenpfeiler, Fahrrinnenbegrenzungen berücksichtigt werden sollen, richtet sich die Zellauflösung an den kleinsten Sicherheitsabständen, damit die Abstände in der flächigen Darstellung erfasst und dargestellt werden können. Zudem sollten die Anforderungen an die Genauigkeit z. B. bei der Bestimmung der benötigten Fahrspurbreite für verschiedene Schiffstypen bei veränderlichen Abflussverhältnissen und Schiffsausrüstung festgelegt werden.

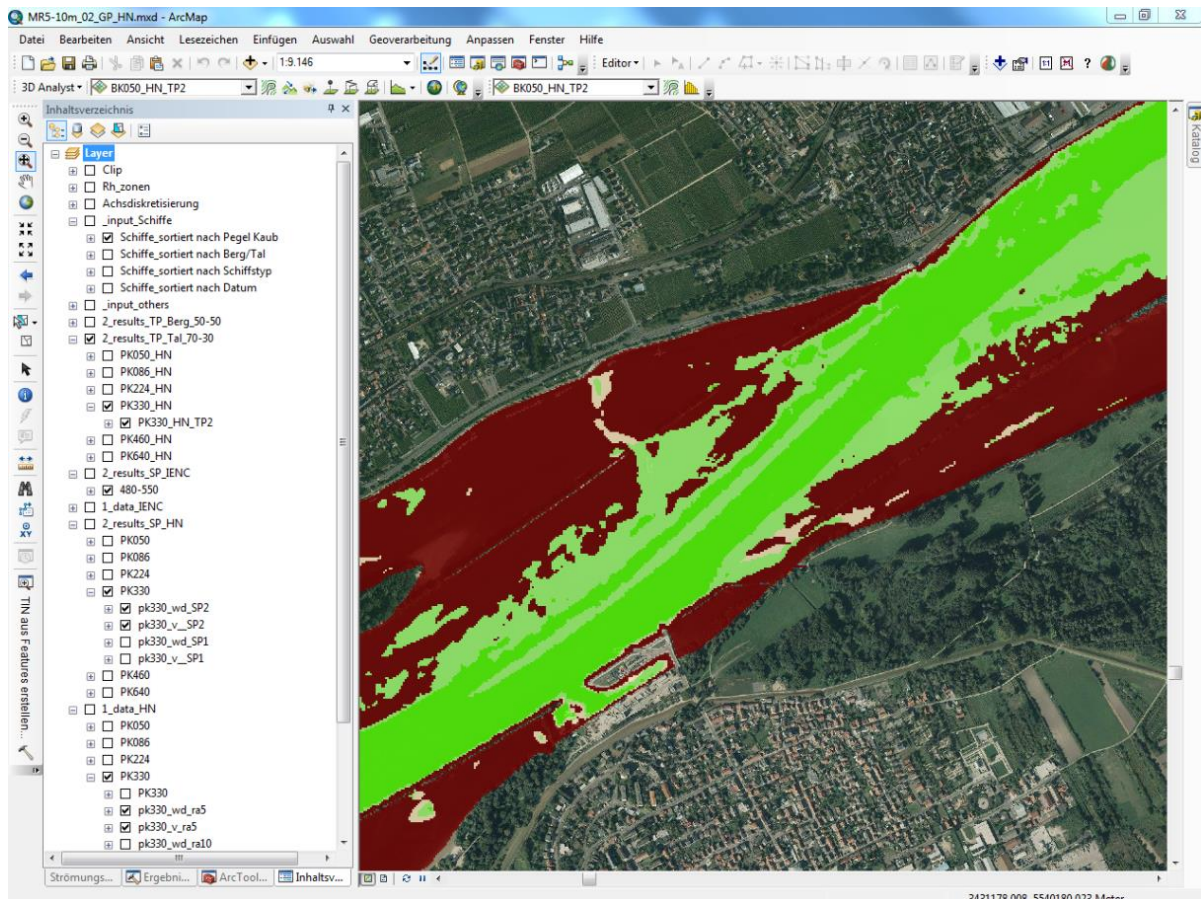


Abbildung 4-28: Inhaltsverzeichnis und Ansichtsfenster aus der Benutzeroberfläche in ArcGIS

Die Berechnungssteuerung in *RiNA* erfolgt mit dem Zugriff auf die zahlreichen Funktionen und Werkzeuge der Geoverarbeitung in ArcGIS. Es existieren unterschiedliche Geoinformationssysteme von OpenSource bis hin zu kommerziellen Produkten mit zusätzlichen (Werkzeug-) Erweiterungen. Die Geoinformationssysteme unterscheiden sich dabei in der Benutzerfreundlichkeit und dem Funktionsumfang. Bei einer Integration von *RiNA* in ein anderes Geoinformationssystem muss gewährleistet werden, dass die verwendeten Funktionen und Werkzeuge auch dort vollständig nachgestellt werden können. Die modulare Programmierung erleichtert die Anbindung, jedoch sollte zuvor die genannte Funktionsprüfung erfolgen und der Aufwand abgeschätzt werden.

Das übergeordnete Informationspanel (siehe Abbildung 4-24) in *RiNA* gibt dem Nutzer bereits Rückmeldung über durchgeführte Aktionen und den Berechnungsfortschritt. Des Weiteren werden in dem Ergebnissenfenster von ArcGIS die verwendeten Werkzeuge aus der Toolbox bzw. mit dem

Geoprozessor durchgeführte Operationen, samt Einstellungen und Meldungen gelistet. Dies ist für fortgeschrittene Nutzer hilfreich.

### 4.6.4 Weiterführende Funktionalitäten

Bei der hydrodynamisch-numerischen Modellierung werden die Strömungskenngrößen an den Knotenpunkten eines Berechnungsnetzes bestimmt. In Abbildung 4-29 (links) sind die Knotenpunkte exemplarisch in rot dargestellt. Für die Vorbereitung der Strömungsdaten zur Potentialentwicklung und Berechnungssteuerung innerhalb *RiNA* ist es erforderlich, diese Punktinformationen durch Interpolation in eine flächige Rasterdarstellung zu überführen (siehe Abbildung 4-29, rechts). Um ungeeignete Interpolationen an den Rändern zu vermeiden, kann ein Polygon festgelegt werden, durch welches die Randbereiche abgeschnitten werden. In Abbildung 4-29 ist das Randpolygon durch blaue Linien gekennzeichnet. Dies begrenzt außerdem die Datenmenge bei den darauf folgenden Berechnungsschritten und ermöglicht dem Anwender zudem auch kleinräumige Gebiete zielführend zu untersuchen, auch wenn das hydrodynamisch-numerische Modell großräumig angelegt wurde.

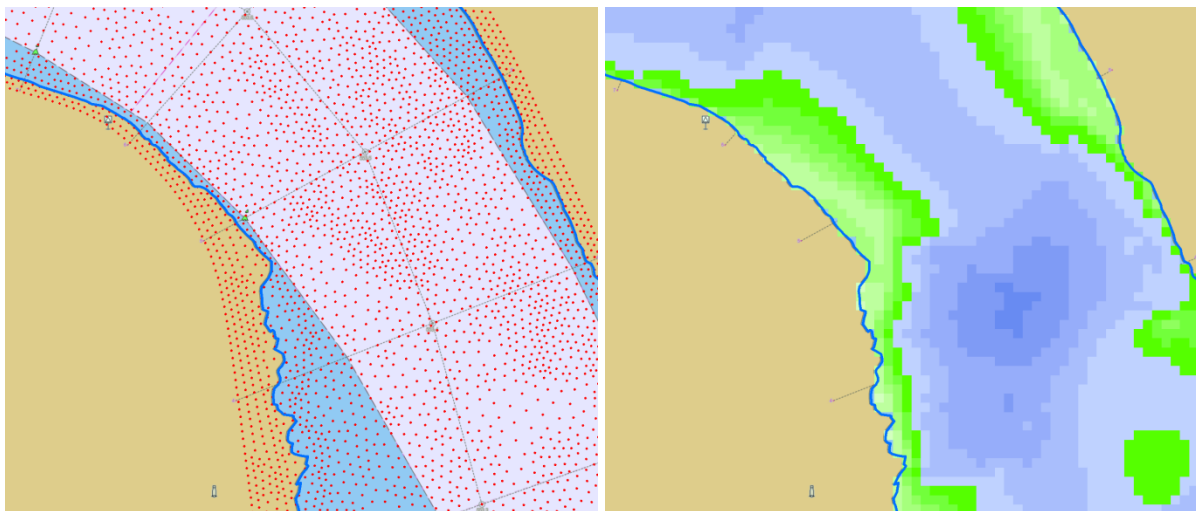


Abbildung 4-29: Konvertierung der Punktinformationen (rot) aus dem Berechnungsnetz des HN-Modells (links) in Rasterinformationen (rechts) mit einer Auflösung von 5 m unter Berücksichtigung eines Randpolygons (blaue Linien)

Um die Softwareentwicklung *RiNA* in der Anwendung möglichst flexibel zu gestalten, wurde bei der Integration von Strömungsdaten ein pegelorientiertes Konzept verfolgt. Beim Einlesen bzw. Prozessieren von Strömungsdaten in Rasterinformationen, werden ein Pegelname und der Pegelstand des zugehörigen Abflusses angegeben. Dies ermöglicht im späteren Verlauf aus bestehenden Strömungsrastern selbst - für einen spezifischen Abfluss - Berechnungsergebnisse aus den umliegenden Pegelstützstellen zu interpolieren, ohne dass das hydrodynamisch-numerische Modell erneut zur Berechnung dieses Abflusses verwendet wird.

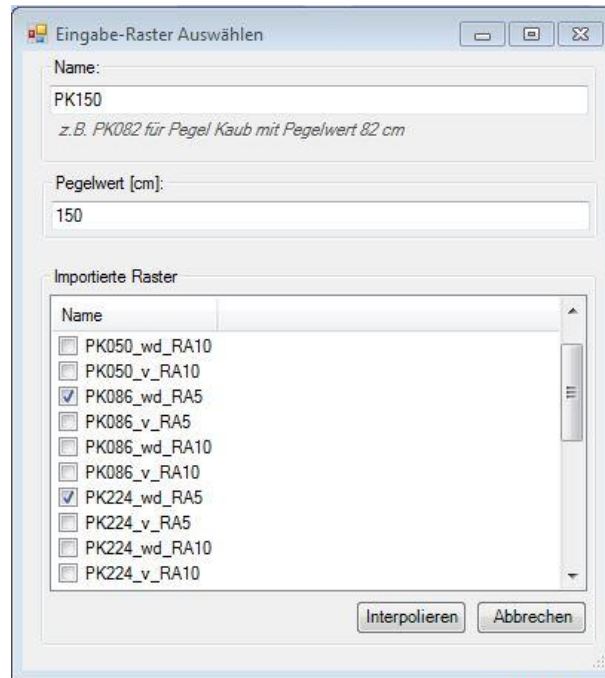


Abbildung 4-30: Eingabemaske für die Interpolation eines Strömungsraster: hier exemplarisch für die Interpolation eines Fließtiefenrasters (wd – water depth) bei einem Pegelstand von 150 cm am Pegel Kaub (PK)

Abbildung 4-30 zeigt exemplarisch die Eingabemaske in *RiNA* für die Interpolation eines Fließtiefenrasters (wd - water depth) bei einem Pegelstand von 150 cm am Pegel Kaub (PK) aus benachbarten Pegelstützstellen (PK086 und PK224 mit 86 cm und 224 cm am Pegel Kaub). Für diese Funktionalität sollte der Anwender jedoch eine ausreichende Streckenkenntnis und Fachwissen haben und die Interpolation nur bei einem monotonen Anstieg der Kenngrößen zwischen den Berechnungsstützstellen anwenden. Vorsicht ist bei plötzlichen Ausuferungen bzw. dem Ansteigen der durchströmten Querschnittsflächen innerhalb eines Streckenabschnittes geboten.

#### 4.6.5 Systemvoraussetzungen

Die Software *RiNA* (Version 1.0) wurde für einen Standard Arbeitsplatz mit Durchführung von *ArcGIS* Anwendungen entwickelt und auf folgender Umgebung erfolgreich getestet: Beim installierten Betriebssystem *Windows 7 Professional* handelt es sich um ein 64 Bit Systemtyp. Der Prozessor ist ein i3 CPU mit 3,20 GHz und der installierte Arbeitsspeicher (RAM) beträgt 16,0 GB.



Für einen vollen Funktionsumfang erfordert *RiNA* folgende Systemkomponenten:

- *ESRI ArcGIS for Desktop Version 10.2.0*  
Kommerzielles Geoinformationssystem des Unternehmens *ESRI*
- *ESRI Extensions*  
*Spatial Analyst Version 10.2*  
*3D Analyst Version 10.2*  
Vorhandene Funktionen und Werkzeuge in *ArcGIS* können durch zusätzliche sogenannte *Extensions* erweitert werden. Diese müssen bereits beim Installationsvorgang von *ArcGIS* mit installiert und können manuell über den Menüpunkt *Anpassen* unter *Erweiterungen* aktiviert werden. Auf die *Extensions* greift im Wesentlichen die Berechnungssteuerung zu.
- *ESRI S-57 Viewer Version 2.2.0*  
Der *S-57 Viewer* ist ein *AddIn* für *ArcGIS* zur Visualisierung des S-57 Datenformates, wie es bei den elektronischen Navigationskarten vorliegt. Als Darstellungs- bzw. Performancestandard liegt der S-52 zu Grunde. Der Viewer ist nicht zwingend für *RiNA* erforderlich, erleichtert jedoch die Integration, Bearbeitung und Selektion von Objekten aus den Navigationskarten. Alternativ können die Navigationskarten mit der Software *FME* interpretiert und im Inhaltsverzeichnis des *ArcGIS* als Gruppenlayer, bestehend aus den einzelnen Objekten im Datenformat „Shapefile“, eingeladen und somit in *RiNA* unter Eingangsdaten in den Berechnungsprozess integriert werden.

Weitere und ergänzende Informationen sind dem Benutzerhandbuch zu dem *River Navigation Assessment Tool - RiNA* zu entnehmen (FZI, 2016 [35]).



## 5 Anwendung des Bewertungsverfahrens

Bevor in den beiden Kapiteln 5.2 und 5.3 die möglichen Anwendungsbereiche des Bewertungsverfahrens *RiNA* in den Fallstudien am Ober- bzw. Mittelrhein sowie am Niederrhein aufgezeigt werden, stellt Kapitel 5.1 die für die beiden Untersuchungsgebiete relevanten Wasserstraßenklassen, Fahrrinntiefen und -breiten sowie die ermittelten Krümmungsradien und aufbereiteten Strömungsinformationen bzw. Naturmessungen von Schiffsfahrten dar.

### 5.1 Untersuchungsgebiete für die Fallstudien

Für die Anwendung und Validierung des Bewertungsverfahrens *RiNA* werden zwei Untersuchungsgebiete am Rhein näher betrachtet. Das erste Untersuchungsgebiet befindet sich an einem der abwechslungsreichsten Streckenabschnitte des Rheins. Untersucht wird großräumig ein Abschnitt des Ober- bzw. Mittelrheins mit über 70 km Länge (siehe Abbildung 5-1), von Rhein-km 483,5 (unterhalb Nierstein) bis Rhein-km 557,5 (unterhalb St. Goar). Wegen der engen Täler in der Gebirgsstrecke (unterhalb Bingen bei Rhein-km 529 bis St. Goar bei Rhein-km 557) mit den vergleichsweise eingeschränkten Querschnitten und Breiten, kann dieser Abschnitt nicht von allen Binnenschiffstypen (z. B. 6er Schubverband, 6SV) befahren werden. Außerdem gilt dieser Streckenabschnitt im Bereich des Loreleyfelsens trotz modernster Technik unter den Schiffsführern als nautisch anspruchsvolle Strecke.



Abbildung 5-1: Untersuchungsgebiet am Ober- und Mittelrhein (Rhein-km 483,5 – 557,5) (verändert nach <http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&value=iencwms>; abgerufen am 01.08.2016)

Das zweite Untersuchungsgebiet befindet sich im Abschnitt des Niederrheins, der für einen Großteil der transportierten Gütermenge am Rhein verantwortlich ist (Anhang 4) und von großen Binnenschiffstypen (6er Schubverband, 6SV) befahren werden kann. Der untersuchte Abschnitt am Niederrhein (siehe Abbildung 5-2) hat eine Ausdehnung von über 35 km Länge und befindet sich zwischen Duisburg-Hochfeld (Rhein-km 777,3) und Wesel (Rhein-km 814).

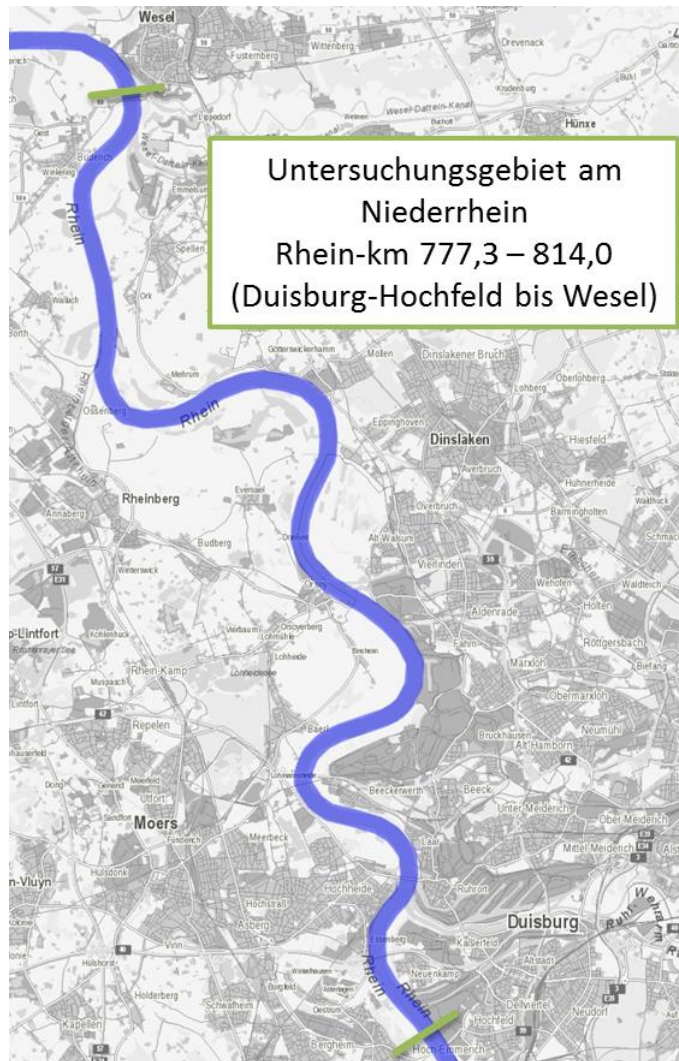


Abbildung 5-2: Untersuchungsgebiet am Niederrhein (Rhein-km 777,3 – 814,0) (verändert nach <http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&value=iencwms>; abgerufen am 01.08.2016)

### 5.1.1 Wasserstraßenklassen

Die zulässigen Größen und Formationen der Motorschiffe, Schleppkähne und Schubverbände einer Wasserstraße sind in der Wasserstraßenklasse festgelegt (Kapitel 3.1 bzw. Anhang 1). Die Höchstabmessungen der Schubverbände und der gekuppelten Fahrzeuge auf dem Rhein können der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (WSV, 2014 [86]) entnommen werden. Auf dem Rhein sind von Basel (Rhein-km 166,64) bis Bad Salzig (Rhein-km 564,3) Schubverbände (4SV) mit einer Länge bis zu 193 m zugelassen. Dies entspricht der Wasserstraßenklasse VI b (siehe Tabelle 3-1 in Kapitel 3.1 bzw.

Anhang 1). Unterhalb von Bad Salzlig bis zur niederländischen Grenze besitzt der Rhein die Wasserstraßenklasse VI c und somit sind sowohl dreireihige und zweigliedrige Schubverbände (6SV, Tal) mit einer Länge bis zu 193 m als auch zweireihige und dreigliedrige Schubverbände (6SV, Berg) mit einer Länge bis zu 269,5 m, zugelassen (Anhang 1).

**Das Untersuchungsgebiet am Ober- bzw. Mittelrhein ist der Wasserstraßenklasse VI b und das im Niederrheinabschnitt der Klasse VI c zugeordnet.**

### 5.1.2 Fahrrinntiefen und -breiten

Bei der Gestaltung und Auslegung der Fahrrinne am freifließenden Rhein von Iffezheim bis zur niederländischen Grenze sind - je nach Streckenabschnitt - eine Breite von 88 m bzw. 92 m, 120 m und 150 m festgelegt (siehe Abbildung 5-3). Die angegebenen Fahrrinntiefen von 1,90 m, 2,10 m, 2,50 m und 2,80 m beziehen sich auf eine Bezugswasserspiegellage im Niedrigwasserbereich, den gleichwertigen Wasserstand (GIW). In einer Veröffentlichung der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) wurden die Fahrrinntiefen und die Fahrrinnenbreite oberhalb Iffezheim angepasst. Zwischen Basel und Iffezheim werden Fahrrinntiefen von 3,00 m auf einer Breite von 88 m vorgehalten.

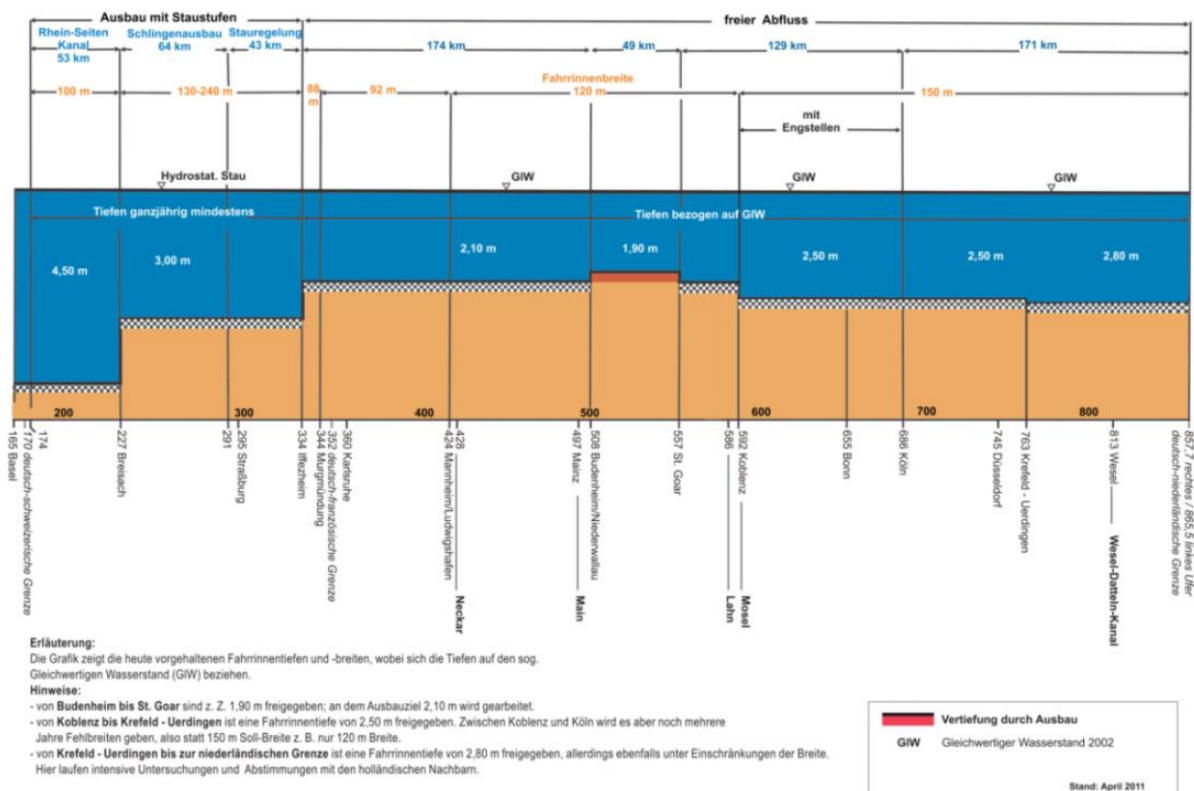


Abbildung 5-3: Fahrrinntiefen und -breiten des Rheins von Basel bis zu niederländischen Grenze (Quelle abgerufen am 01.08.2016 unter: [http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/dateien/2011/Rhein\\_Fahrrinntiefe\\_und-breite2011\\_2.pdf](http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/dateien/2011/Rhein_Fahrrinntiefe_und-breite2011_2.pdf))

In dem Untersuchungsgebiet am Ober- bzw. Mittelrhein werden Fahrrinntiefen zwischen 2,10 m (bis Rhein-km 508 bei Budenheim im Rheingau) und 1,90 m (ab Rhein-km 508 bis St. Goar bei Rhein-km 557 in der Gebirgsstrecke) bezogen auf GIW auf einer Fahrrinnenbreite von 120 m vorgehalten. In dem Untersuchungsgebiet im Niederrheinabschnitt werden Fahrrinntiefen von 2,80 m bezogen auf den GIW auf einer Fahrrinnenbreite von 150 m vorgehalten. Im Niederrheinabschnitt ist die Lage der Fahrrinne visuell nicht wie in dem ersten Untersuchungsgebiet durch Fahrrinnenbegrenzungsstonnen gekennzeichnet. In den elektronischen Navigationskarten ist die Fahrrinne als Flächenobjekt dargestellt.

### 5.1.3 Krümmungsradien

Die Krümmungsradien werden aus der Fahrrinnenachse abgeleitet. Hierfür werden aus der Fahrrinne zunächst die Achspunkte an den Querprofilen ermittelt. Für die Berechnung der Radien werden dabei aus drei aufeinanderfolgenden Achspunkten ein Kreissegment konstruiert, eine Kreisapproximation durchgeführt und die Radien bestimmt. Bei Fahrrinnenteilungen, Stromspaltungen oder am Übergang von Fahrrinnenbreitenänderungen ist die Aussagekraft der Radien nur eingeschränkt gültig.

In Abbildung 5-4 sind die Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse von Rhein-km 483,5 bis 557,5 für den untersuchten Ober- und Mittelrheinabschnitt dargestellt. Aus der Theorie bekannte Kenngrößen für Radien (Kapitel 2.1.2) wie 500 m (Untergrenze) und 2000 m (Geradeausfahrt) in Fließgewässern (Graewe, 1971 [36]) und ergänzend als zusätzlichen Richtwert 1000 m sind in der Abbildung eingetragen.

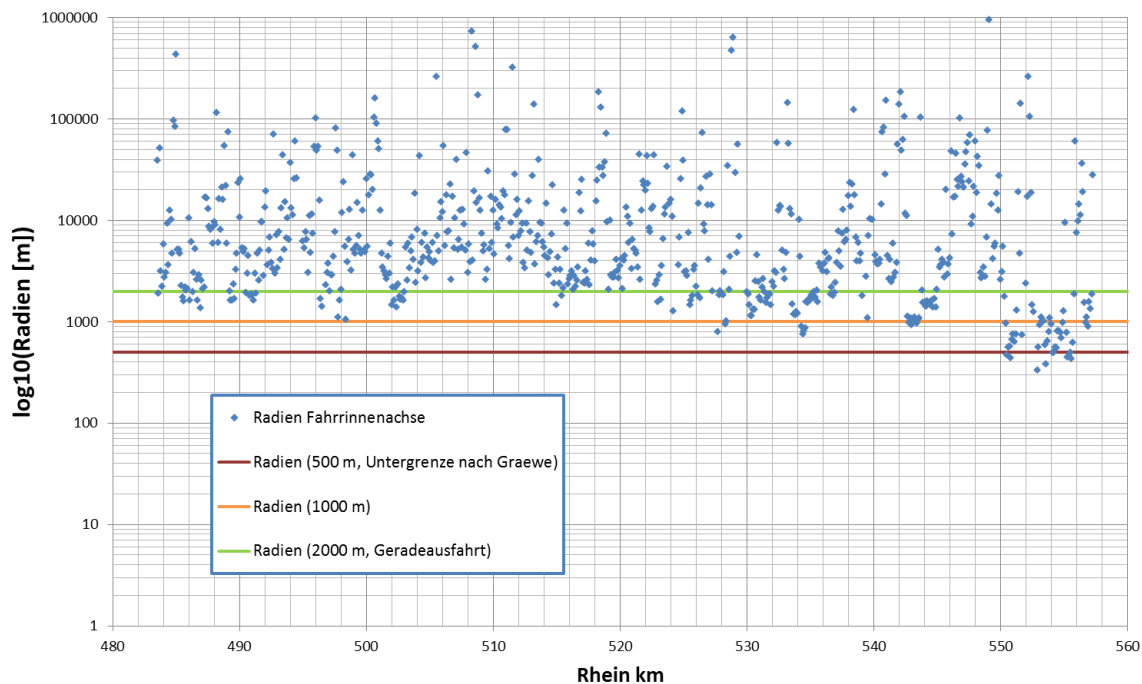


Abbildung 5-4: Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse von Rhein-km 483,5 bis 557,5 (Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt)



In dem Untersuchungsgebiet am Ober- und Mittelrhein sind Krümmungsradien bezogen auf die Fahrrinnenachse ab 300 - 400 m vorhanden. Die kleinsten Radien liegen in der Gebirgsstrecke bei Rhein-km 550,5 oberhalb des Tauberwerth / Jungferngrund, bei Rhein-km 552,9 am Kammereck unterhalb des Geisenrückens, bei Rhein-km 553,6 am Betteck, bei Rhein-km 554,1 bei den Loreleyfelsen sowie bei Rhein-km 555,3 am Bankeck unterhalb des Schutzhafens Loreley vor.

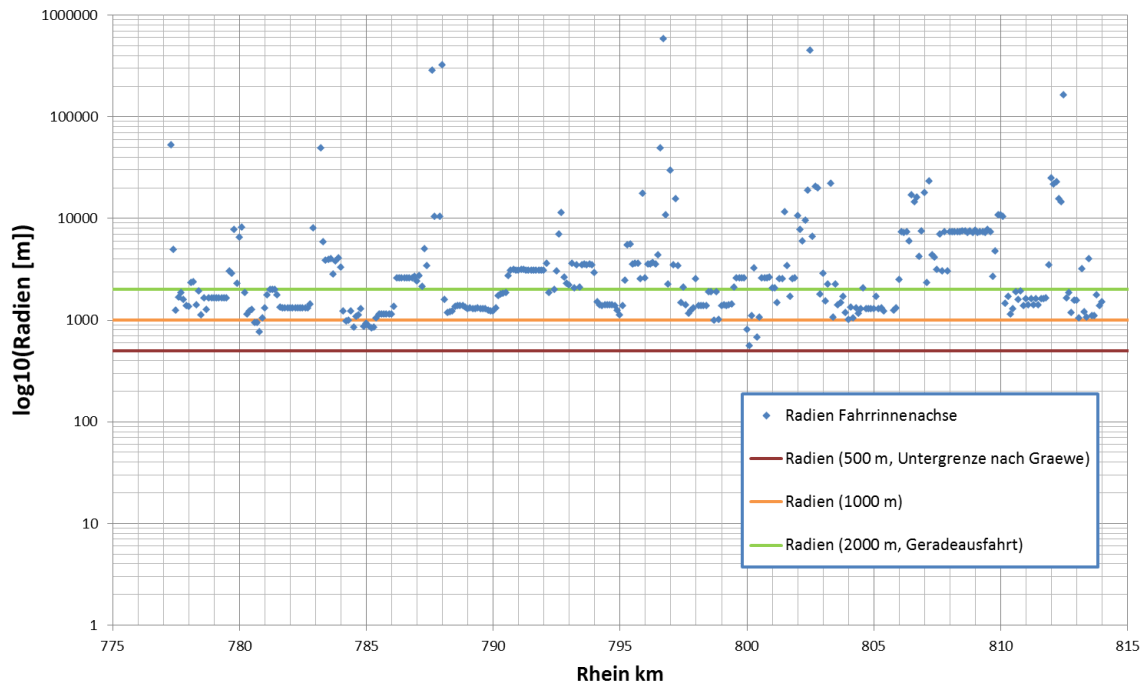


Abbildung 5-5: Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse von Rhein-km 777,3 bis 814,0 (Niederrheinabschnitt)

Für den Niederrheinabschnitt von Rhein-km 777,3 bis 814,0 sind die Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse in Abbildung 5-5 dargestellt. Die kleinsten Radien liegen zwischen 500 - 600 m im Bereich der Orsoyer Rheinbögen bei Rhein-km 800,1 vor.

#### 5.1.4 Strömungsinformationen

Für die modelltechnischen Untersuchungen der beiden Untersuchungsgebiete wurde auf die Berechnungsergebnisse zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer (2D-HN-) Modelle zurückgegriffen. Die Modelle der Wasserstraßen wurden im Rahmen von Projekten an der BAW (z. B. „Abladeoptimierung Mittelrhein“ bzw. „Bergsenkungsgebiet am Niederrhein“) erstellt, kalibriert und fortlaufend aktualisiert. Weitere Informationen zum verwendeten Modellierungsverfahren, der Modellbildung, Randbedingungen etc., können Kapitel 4.3.2 und den jeweiligen Abschlussberichten (BAW, 2013 [6]; BAW, 2015 [9]) entnommen werden.

Die Aufbereitung der unregelmäßig verteilten Strömungsinformationen (unstrukturiertes Berechnungsgitter) erfolgt innerhalb des entwickelten Bewertungsverfahrens *RiNA*. Hierbei werden die an den Knotenpunkten des HN-Modells berechneten Strömungskenngrößen über eine

Triangulierung in sogenannte Rasterinformationen mit benutzerdefinierter Zellauflösung überführt. Um die Ausdehnung eines Untersuchungsgebietes und somit auch das Datenvolumen bei entsprechender Zellauflösung zu begrenzen, kann ein Bereich festgelegt (z. B. Fahrrinnenbereich, Überflutungsfläche bei Mittelwasser) und die Kenngrößen für den ausgewiesenen Bereich in Rasterinformationen konvertiert werden (Kapitel 4.6.4). Die Werte außerhalb dieses Bereiches werden verworfen. Je nach gewünschtem Zielkoordinatensystem wird ggf. eine geeignete Koordinatentransformation durchgeführt.

Für die beiden Untersuchungsgebiete des Ober- bzw. Mittelrheins und Niederrheins wurden an repräsentativen Pegelstützstellen (siehe Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2) über das Abflussspektrum (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser) die Strömungskenngrößen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) aus den HN-Modellen in Rasterinformationen überführt. Die Kurzbezeichnungen für die Legenden und die Zuordnung des entsprechenden Abflusses bzw. Pegelstandes sind ebenfalls aufgeführt. Die Kurzbezeichnungen wurden in den Fallstudien verwendet. Aufgrund der z. T. starken Ungleichwertigkeit im Anstieg der Wasserspiegellagen (siehe Abbildung 3-6 in Kapitel 3.2.2.1) im Bereich des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes wurden weitere Stützstellen in die Berechnung der Strömungskenngrößen aufgenommen. Die berechneten Parameter beziehen sich stets auf einen bestimmten Abfluss bei einem entsprechenden Pegelstand. Dies ermöglicht für eine Vorabschätzung ggf. weitere Zwischenschritte zu berechnen, ohne das HN-Modell zu aktivieren (Kapitel 4.6.4).

**Der Pegel Kaub (Kürzel PK; Rhein-km 546,3) ist Bezugspegel für das Untersuchungsgebiet am Ober- bzw. Mittelrhein und der Pegel Ruhrort (Kürzel PR; Rhein-km 780,8) für das am Niederrhein.**

Tabelle 5-1: Pegelwerte und Abflüsse von Niedrig- bis Hochwasser bezogen auf den Pegel Kaub (Rhein-km 546,3) für die Untersuchungen des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes

	< NW	NW	MW	> MW	HW ~ HWM I	HW ~ HWM II
Pegel Kaub [cm]	50	86	224	330	460	640
Abfluss [m³/s]	654	791	1650	2490	3410	5460
Bezeichnung in der Legende	PK050	PK086	PK224	PK330	PK460	PK640

Tabelle 5-2: Pegelwerte und Abflüsse Von Niedrig- bis Hochwasser bezogen auf den Pegel Ruhrort (Rhein-km 780,8) für die Untersuchungen des Niederrheinabschnittes

	NW	MW	HW ~ HWM I	HW ~ HWM II
Pegel Ruhrort [cm]	224	401	930	1149
Abfluss [m³/s]	985	2010	7225	10930
Bezeichnung in der Legende	PR224	PR401	PR930	PR1149

Die berechneten Strömungskenngrößen am Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt wurden im Fahrrinnenbereich entlang der Fließstrecke statistisch ausgewertet (Zonenauswertung der Fahrrinne alle 100 m). Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 zeigen die Ergebnisse der Zonenauswertung in der Fahrrinne für die mittlere Wassertiefe (wd) und Fließgeschwindigkeit (v) bei den untersuchten Abflüssen der beiden Untersuchungsgebiete auf Basis einer Zellauflösung von 5 m.

Im Untersuchungsgebiet des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes sind im Bereich der Gebirgsstrecke (ab Rhein-km 529) bei höheren Abflüssen eine Zunahme der Wassertiefen und eine deutliche Zunahme der Fließgeschwindigkeiten erkennbar. Die mittleren Wassertiefen verlaufen vor allem in der Gebirgsstrecke weniger homogen aufgrund der vorhandenen ausgeprägten Kolkstrukturen.

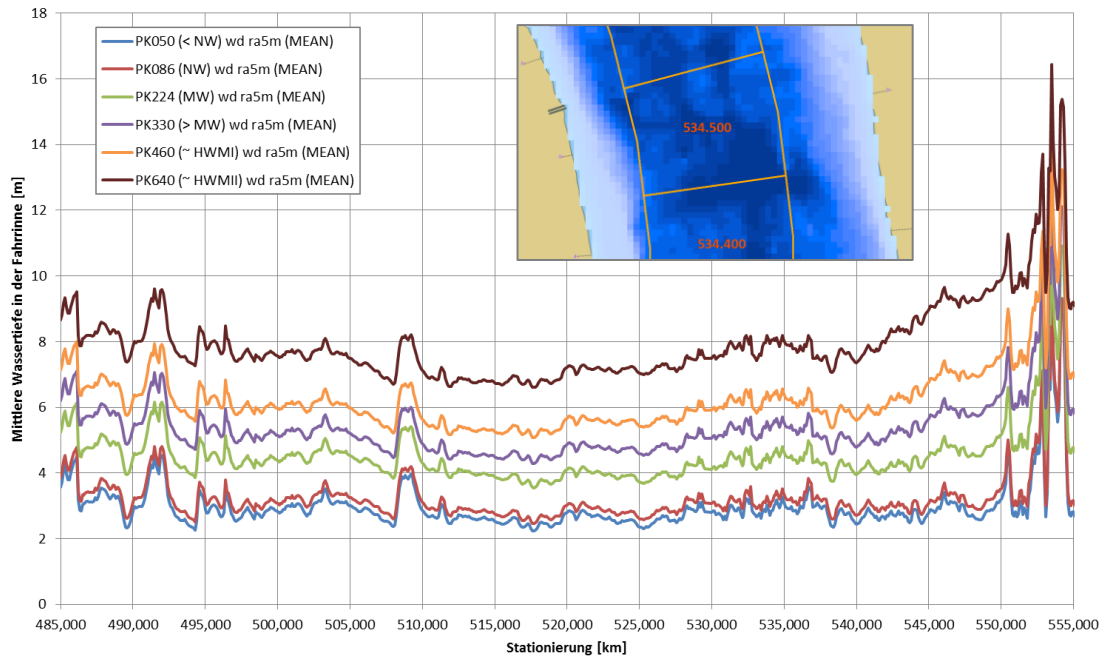


Abbildung 5-6: Zonenauswertung der mittleren Wassertiefe (wd) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt

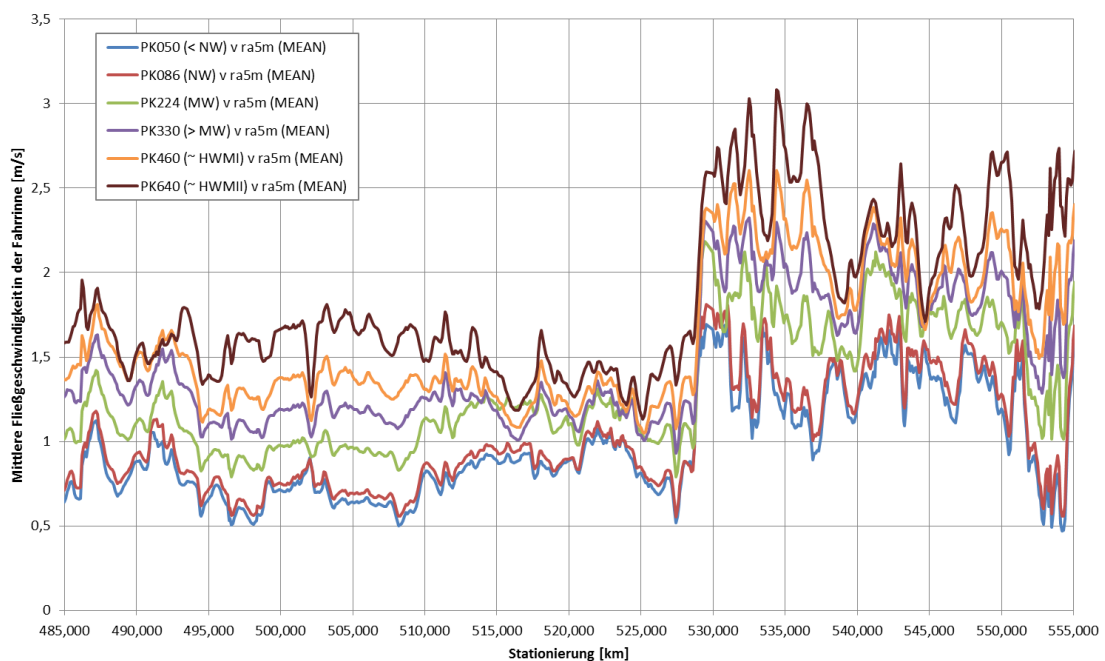


Abbildung 5-7: Zonenauswertung der mittleren Fließgeschwindigkeiten (v) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt



Im Niederrheinabschnitt ist der Verlauf der mittleren Wassertiefen in der Fahrrinne (Zonenauswertung der Fahrrinne alle 100 m) über die verschiedenen Abflüsse vergleichsweise homogen (siehe Abbildung 5-8).

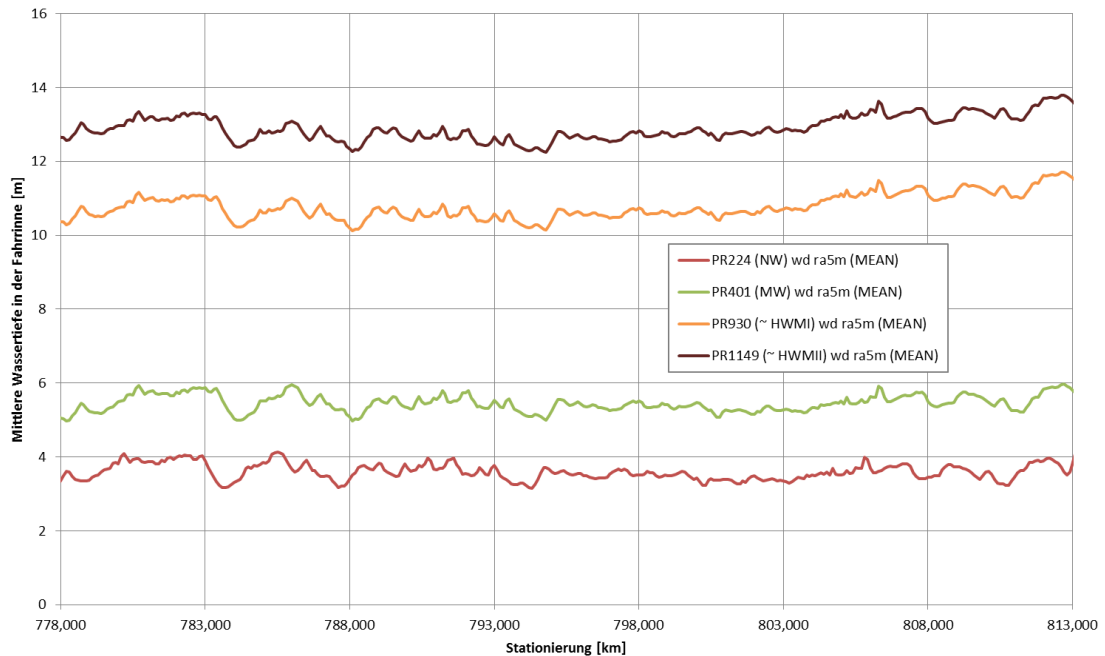


Abbildung 5-8: Zonenauswertung der mittleren Wassertiefe (wd) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Niederrheinabschnitt

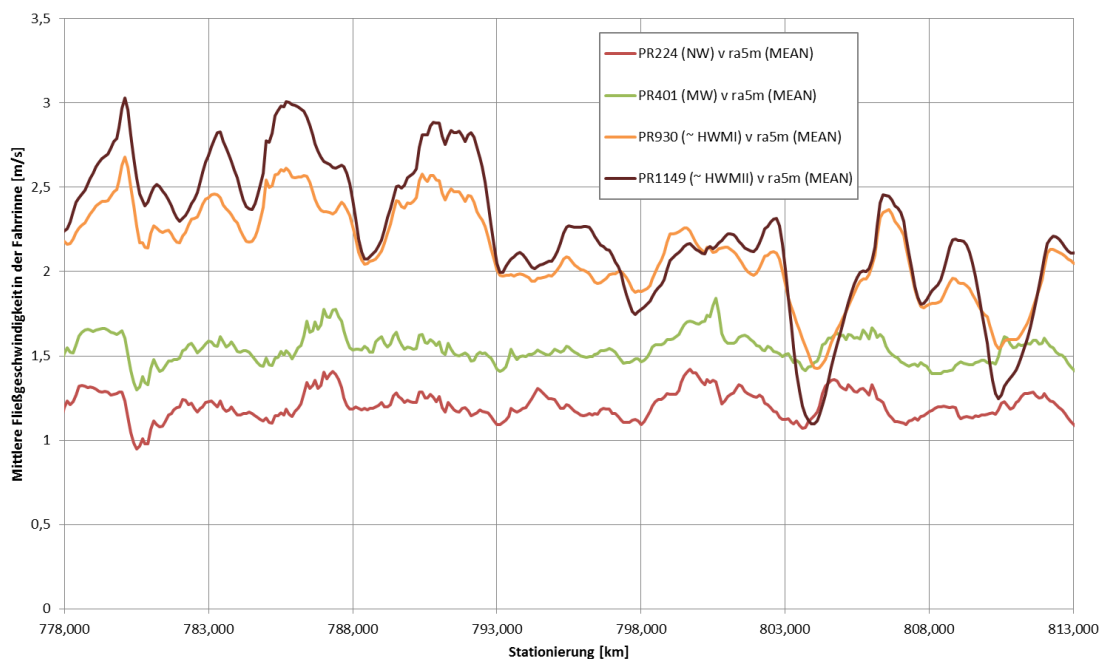


Abbildung 5-9: Zonenauswertung der mittleren Fließgeschwindigkeit (v) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Niederrheinabschnitt

Hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten trifft dies lediglich zwischen Niedrig- und Mittelwasser zu. Bei Hochwasserabflüssen hingegen sinken die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Fahrrinnenbereich stellenweise (z. B. Rhein-km 804,0 und 810,5) auf das Niveau wie bei Niedrig- bzw. Mittelwasser (siehe Abbildung 5-9). Ursache ist die bei Hochwasserabflüssen auftretende Verlagerung der Hauptströmung des Flusses und die verstärkte Überströmung der Vorländer in diesen Bereichen.

### 5.1.5 Naturmessungen von Schiffsfahrten

Für den Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt und den Niederrheinabschnitt liegen aufgezeichnete Fahrten (überwiegend der Jahre von 2009 bis 2014) unterschiedlicher Schiffstypen (TMS, GMS, üGMS und SV) und deren Abmessungen bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen (NW, MW, HW) in der Berg- und Talfahrt vor. Diese Großausführungsmessungen wurden im fließenden Verkehr aufgezeichnet. Kapitel 4.5 stellt exemplarisch den Ablauf der Messung, Aufbereitung und Bereitstellung der Daten für das Bewertungsverfahren *RiNA* dar. Sofern möglich wurden Fahrten für alle im Streckenabschnitt verkehrenden Schiffstypen sowohl bei der Berg- als auch bei der Talfahrt bei unterschiedlichen Abflusszuständen ausgewählt. Bereiche mit Überholungen bzw. Begegnungen sind nicht gekennzeichnet. Als zeitliche Auflösung für die Auswertung der im Sekundentakt vorliegenden Messdaten hat sich bei den Untersuchungen eine konstante Zeitschrittweite von 30 s bewährt, um die globale Bewegungsrichtung des Schiffes zu beschreiben und kleinräumige Versätze im Fahrtverlauf (z. B. Wartemanöver) bei feinerer Diskretisierung zu vermeiden. In der Arbeit von *Scherer, 2015 [73]* ist die Aufbereitung und Auswertung der Daten exemplarisch für einen Abschnitt des Ober- bzw. Mittelrheins detailliert dokumentiert.

Gemäß § 11.02 der RheinSchPV (*WSV, 2014 [86]*) dürfen Schubverbände aufgrund der Abmessungen (Länge > 116,50 m, entspricht hier 4SV) in dem Streckenabschnitt zwischen Lorch (Rhein-km 540,2) und St. Goar (Rhein-km 556,0) nicht - ohne Sondergenehmigung - zu Tal fahren. Es liegen somit für die Talfahrt keine Daten im Bereich der Gebirgsstrecke für den 4SV vor.

Im Untersuchungsgebiet des Ober- bzw. Mittelrheins wurden 33 aufgezeichnete Fahrten aufbereitet. Hierfür wurden entsprechende Workflows mit der Software *FME* entwickelt. 15 Tal- (siehe Tabelle 5-3) und 18 Bergfahrten (siehe Tabelle 5-4) standen im Abschnitt des Ober- bzw. Mittelrheins zur Verfügung. Die Abflusszuordnung für den Streckenabschnitt erfolgt bezogen auf den Pegel Kaub (Rhein-km 546,3). Sofern die Abladetiefen bei den Messungen dokumentiert wurden, wurden diese bei den entsprechenden Fahrten ergänzt. Sofern zweierlei Werte in der Spalte Abladetiefe stehen, handelt es sich dabei um die Angaben für Bug / Heck des Schiffes oder um die Angaben für verschiedene Leichter.

Tabelle 5-3: Nach Talfahrt und Schiffstyp aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (verändert nach Scherer, 2015 [73])

Schiffsname	Schiffstyp	Schiffslänge [m]	Schiffsbreite [m]	von km ...	bis km ...	Berg/Tal	Datum	Abfluss [m³/s] (Kaub)	Zuordnung	Abladetiefe [m]
Roma	TMS	106,00	11,45	499	523	Tal	12.11.2010	1250-1230	< MW	0,85
Victoria Jaegers	TMS	108,00	11,45	490	560	Tal	25.04.2013	2300	> MW	2,90
Victoria Jaegers	TMS	108,00	11,45	490	560	Tal	06.05.2013	2570	> MW	2,60
Victoria Jaegers	TMS	108,00	11,45	490	560	Tal	12.06.2013	3460	HW ~ HWMI	2,90
Covano	üGMS	135,00	17,00	490	560	Tal	25.02.2013	1560	MW	2,10/2,50
Covano	üGMS	135,00	17,00	494	560	Tal	05.02.2013	4360	HW > HWMI	1,85/1,90
Amethyst	2SV	192,00	11,45	502	556	Tal	11.01.2012	3400	HW ~ HWMI	3,15/3,20
Duality	2SV	180,00	11,40	498	560	Tal	24.11.2011	677	< NW	1,20
Duality	2SV	180,00	11,40	496	560	Tal	02.08.2011	1470	MW	-
Duality	2SV	180,00	11,40	496	560	Tal	10.08.2011	1620	MW	-
Duality	2SV	180,00	11,40	498	560	Tal	19.04.2012	1700	MW	1,20
Duality	2SV	180,00	11,40	498	560	Tal	19.12.2011	2960-2950	> MW	1,20
Veronique	2SV	181,00	11,45	501	556	Tal	13.01.2012	2750	> MW	2,15
Camaro	4SV	190,00	21,20	499	525	Tal	03.10.2010	1530-1480	MW	1,45
Camaro	4SV	190,00	21,20	501	525	Tal	14.11.2010	1790-1640	MW	1,55

Tabelle 5-4: Nach Bergfahrt und Schiffstypen aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (verändert nach Scherer, 2015 [73])

Schiffsname	Schiffstyp	Schiffslänge [m]	Schiffsbreite [m]	von km ...	bis km ...	Berg/Tal	Datum	Abfluss [m³/s] (Kaub)	Zuordnung	Abladetiefe [m]
Victoria Jaegers	TMS	108,00	11,45	560	490	Berg	30.04.2013	2410	> MW	1,00
Victoria Jaegers	TMS	108,00	11,45	560	490	Berg	24.05.2013	2410	> MW	1,20
Niklas	TMS	110,00	11,45	555	504	Berg	11.01.2012	3440	HW ~ HWMI	2,80
Svenja Reich	TMS	110,00	11,45	556	523	Berg	13.01.2011	4470	HW > HWMI	3,50
Stadt Gera	TMS	110,00	9,00	556	513	Berg	12.01.2011	4520	HW > HWMI	2,43
Amsterdam	TMS	110,00	10,50	527	504	Berg	03.10.2010	1530-1490	MW	2,90
Stolt Lausanne	TMS	110,00	11,40	527	506	Berg	14.11.2010	1830-1730	MW	2,53
Covano	üGMS	135,00	17,00	560	501	Berg	03.03.2013	1440	MW	1,00/1,50
Amoureux	üGMS	135,00	11,45	553	528	Berg	11.01.2012	3450	HW ~ HWMI	2,50
Frontera	üGMS	135,00	15,00	528	506	Berg	12.11.2010	1240-1210	< MW	1,60
Providence	üGMS	135,00	11,44	528	506	Berg	11.11.2010	1290-1240	< MW	2,25
Royal	2SV	176,50	12,00	560	502	Berg	26.04.2011	860	NW	1,70
Duality	2SV	180,00	11,40	560	498	Berg	01.02.2012	2030	> MW	3,10
Contargo	2SV	181,00	11,45	527	505	Berg	03.10.2010	1530-1490	MW	1,60
Anaconda	2SV	190,00	11,40	528	504	Berg	02.10.2010	1580-1550	MW	3,00
Duality	2SV	180,00	11,40	560	498	Berg	15.12.2011	1640-1630	MW	3,00
Circle	2SV	190,00	11,45	525	504	Berg	14.11.2010	1810-1660	MW	3,07
Camaro	4SV	190,00	21,20	560	494	Berg	20.12.2013	1170	< MW	1,20

Im Untersuchungsgebiet des Niederrheins wurden 28 aufgezeichnete Fahrten aufbereitet. Darunter standen 16 Tal- (siehe Tabelle 5-5) und 12 Bergfahrten (siehe Tabelle 5-6) zur Verfügung. Die Abflusszuordnung für den Streckenabschnitt erfolgt bezogen auf den Pegel Ruhrort (Rhein-km 780,8). Sofern die Abladetiefen bei den Messungen dokumentiert wurden, wurden diese bei den entsprechenden Fahrten ergänzt. Sofern zweierlei Werte in der Spalte Abladetiefe stehen, handelt es sich dabei um die Angaben für Bug / Heck des Schiffes oder um die Angaben für verschiedene Leichter.

Tabelle 5-5: Nach Talfahrt und Schiffstyp aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Niederrheinabschnittes

Schiffsname	Schiffstyp	Schiffslänge [m]	Schiffsbreite [m]	von km ...	bis km ...	Berg/Tal	Datum	Abfluss [m³/s] (Ruhrort)	Zuordnung	Abladetiefe [m]
VictoriaJaegers	TMS	108,37	11,45	604,7	857,2	Tal	05.05.2013	2626	MW	2,60
VictoriaJaegers	TMS	108,37	11,45	604,7	857,2	Tal	25.04.2013	2820	> MW	2,90
VictoriaJaegers	TMS	108,37	11,45	690,3	857,3	Tal	12.06.2013	4065-3906	> MW	2,90
Covano	üGMS	135,00	17,00	657,5	853	Tal	25.02.2013	2264	MW	2,90/3,00
Covano	üGMS	135,00	17,00	858	691,9	Tal	05.02.2013	6175-5859	HW < HWMI	1,88/1,90
Duality	2SV	180,00	11,40	604,7	855	Tal	24.11.2011	838	NW	0,70/1,60
Duality	2SV	180,00	11,40	604,6	855	Tal	02.08.2011	1741	MW	-
Duality	2SV	180,00	11,40	729,8	855	Tal	10.08.2011	1906	MW	-
Duality	2SV	180,00	11,40	604,8	855	Tal	19.12.2011	4759-4575	HW < HWMI	0,70/1,60
Duality	2SV	180,00	11,40	604,7	854,9	Tal	19.04.2012	4769-4656	HW < HWMI	0,70/1,60
Veerhaven	4SV	193,00	22,80	791,5	857,3	Tal	02.03.2014	2147	MW	-
Camaro	4SV	191,00	21,25	604,6	856,8	Tal	14.12.2013	2542-2123	MW	1,80
Herkules	6SV	190,00	34,20	780,7	857,7	Tal	26.07.2006	1217	NW	2,10
Veerhaven	6SV	193,00	34,20	791,8	857,3	Tal	05.03.2014	2102	MW	-
Veerhaven	6SV	193,00	34,20	792,9	857,3	Tal	28.02.2014	2134	MW	-
Herkules	6SV	190,00	34,20	770,9	846,2	Tal	07.03.2007	5480	HW < HWMI	2,00

Tabelle 5-6: Nach Bergfahrt und Schiffstypen aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Niederrheinabschnittes

Schiffsname	Schiffstyp	Schiffslänge [m]	Schiffsbreite [m]	von km ...	bis km ...	Berg/Tal	Datum	Abfluss [m³/s] (Ruhrort)	Zuordnung	Abladetiefe [m]
VictoriaJaegers	TMS	108,37	11,45	857,2	604,3	Berg	30.04.2013	2960	> MW	0,80/1,60
VictoriaJaegers	TMS	108,37	11,45	857,2	604,3	Berg	23.05.2013	3929	> MW	0,80/1,60
Covano	üGMS	135,00	17,00	852,5	691,7	Berg	03.03.2013	1960	MW	0,80/1,50
Duality	2SV	180,00	11,40	854,9	604,8	Berg	22.11.2011	848	NW	1,55
Duality	2SV	180,00	11,40	854,9	613,8	Berg	13.10.2011	1903	MW	2,90
Duality	2SV	180,00	11,40	854,9	604,2	Berg	15.12.2011	2883-2611	> MW	3,00
Duality	2SV	180,00	11,40	854,9	670,4	Berg	31.01.2012	3127	> MW	3,10
Herkules	4SV	185,00	22,80	821,5	777,3	Berg	20.06.2009	2037	MW	2,50
Camaro	4SV	191,00	21,25	856,8	604,2	Berg	20.12.2013	3012-2520	> MW	1,20
Herkules	6SV	266,50	22,80	858	770,7	Berg	28.07.2006	1167	NW	2,50
Veerhaven	6SV	269,50	22,80	857,3	791,3	Berg	28.02.2014	2098	MW	-
Veerhaven	6SV	269,50	22,80	857,2	791,3	Berg	03.03.2014	2224	MW	-

Die aufgezeichneten Schiffsfahrten aus den Großausführungsmessungen werden verwendet, um das im Rahmen der Arbeit entwickelte Bewertungsverfahren *RiNA* und die Entwicklung der Gesamtpotentiale bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen, Schiffstypen, Abladetiefen, Berg- und Talfahrt zu validieren und zu analysieren.

## 5.2 Fallstudien und Analysen am Ober- bzw. Mittelrhein

Die Fallstudien zeigen, wie die Einzel- und Gesamtpotentiale entwickelt und mit aufgezeichneten Schiffsfahrten validiert und analysiert werden können. Verschiedene Studien durch Variation der Strömungskenngrößen sowie Detailstudien einzelner Streckenabschnitte zeigen den Nutzen und die vielfältigen Anwendungsbereiche des mit *ArcGIS* kombinierten Bewertungsverfahrens *RiNA*. Zudem werden Hinweise auf die Entwicklung der Einzel- bzw. Gesamtpotentiale an einigen Besonderheiten innerhalb des Untersuchungsgebietes (z. B. Fahrrinnenteilung oder Brückenbereiche) gegeben, und es wird aufgezeigt, wie die aufgezeichneten Schiffsfahrten analysiert, verglichen und bewertet werden können.

In großräumigen Untersuchungen (etwa 70 km) hat sich die Anwendung des Bewertungsverfahrens *RiNA* mit einer Diskretisierung der Zellauflösung von 5 m und in darauf aufbauenden Detailstudien mit z. T. feinerer Diskretisierung (1-2 m) bewährt. Die Zellauflösung sollte sich zudem an der Berechnungsgittergröße des HN-Modells und den Anforderungen für die Genauigkeit z. B. bei der

Bestimmung der Fahrspurbreite eines Schiffes orientieren. Bei der Aufbereitung und Analyse der Schiffsfahrten wurden Workflows mit der Software *FME* u. a. zur Bestimmung der Querströmungsanteile auf eine Kursachse entwickelt. Die Fallstudien am Ober- bzw. Mittelrhein beziehen sich auf stationäre Fahrten im ungestörten Verkehr.

Bei den Untersuchungen am Niederrhein (Kapitel 5.3) werden ergänzend Befahrbarkeitspotentiale im fließenden Verkehr (z. B. Begegnung) bei stationärer Fahrt entwickelt. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie - basierend auf den Befahrbarkeitspotentialen - zunächst sogenannte Basisleitlinien generiert werden. Durch Schiffspositionierung sowie Schiffsausrichtung - abgeleitet aus aufgezeichneten Schiffsfahrten - kann anhand weiterer entwickelter Workflows mit der Software *FME*, die Schleppfläche und somit der Fahrspurbreitenbedarf innerhalb des untersuchten Streckenabschnittes bestimmt werden.

### 5.2.1 Potentialentwicklung

Für den Streckenabschnitt im Ober- bzw. Mittelrhein werden für die Potentialentwicklung der berechneten Abflüsse aus dem 2D-HN-Modell (Kapitel 5.1.4) der Tiefenanspruch, die Tiefenfreigabe und die Geschwindigkeitsgrenze gemäß Tabelle 5-7 festgelegt. Die Geschwindigkeitsgrenze wurde aus den allgemeinen Angaben gemäß den technischen Vorgaben der Mindestgeschwindigkeit und Stoppeigenschaften aus der Binnenschiffahrtsuntersuchungsordnung (BinSchUO; *WSV, 2014 [85]*) abgeleitet. Der allgemeine Tiefenanspruch wird anhand der Tiefgangsangaben im Klassifizierungssystem der Binnenwasserstraßen (Anhang 1) bzw. anhand der abflussabhängig definierten Fahrrinntiefen (*BMVBS, 2014 [12]*) festgelegt. Werden gezielt aufgezeichnete Schiffsfahrten aus Großausführungsmessungen untersucht, müssen die Parameter entsprechend den Schiffseigenschaften, Tiefgang, Squat, Flottwasser, Sicherheitszuschläge, Geschwindigkeit bestimmt werden. Mit den Zuschlägen in der Tiefe kann die Sicherheit erhöht werden. Gleichzeitig wird dadurch aber auch ggf. die Wirtschaftlichkeit und Leichtigkeit verringert. Der Pegel Kaub (Kürzel PK) bei Rhein-km 546,3 ist Bezugspegel für das Untersuchungsgebiet am Ober- bzw. Mittelrhein.

Tabelle 5-7: Parameter für die Potentialentwicklung im Bereich des untersuchten Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (Bezugspegel Kaub: PK)

	< NW	NW	MW	> MW	HW ~ HWM I	HW ~ HWM II
Bezeichnung in der Legende	PK050	PK086	PK224	PK330	PK460	PK640
Tiefenanspruch verringert [cm]	150	190	285	365	450	450
Tiefenfreigabe [cm]						
Tal = Tiefenanspruch + 1 m	250	290	385	465	600	600
Berg = Tiefenanspruch + 2 m	350	390	485	565	700	700
Geschwindigkeitsgrenze [m/s]	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6

Für die großräumigen Untersuchungen werden die Strömungskenngrößen aus den HN-Modellen für die verschiedenen Abflüsse jeweils getrennt für die Berg- und Talfahrt gemäß Tabelle 5-7 verarbeitet. Aus den 24 Einzelpotentialen werden durch Kombination und Wichtung 12 Gesamtpotentiale generiert. Die Wichtungsfaktoren sind abhängig von der Zielsetzung der Fragestellung, denn bei einer reinen Analyse und Auffinden von z. B. Tiefenengpässen haben die Einzelpotentiale aus den Fließ-

geschwindigkeiten eine untergeordnete Rolle, hingegen müssen diese bei einer Ermittlung und Analyse potentieller Fahrtrouten aus wirtschaftlichen Gründen berücksichtigt werden. Wichtig bei einem Vergleich von berechneten Gesamtpotentialen über die Gewässerabschnitte hinaus bzw. von mehreren aufgezeichneten Fahrten ist, dass eine anschließende Bewertung nur bei gleicher Wichtungsverteilung bzw. gleichen Randbedingungen durchgeführt wird.

Exemplarisch wurde bei der Verteilung der Wichtungsfaktoren zu Tal die Fließgeschwindigkeit mit 0,3 im Vergleich zu der Wassertiefe mit 0,7 geringer gewichtet, als zu Berg (0,5 / 0,5), da ein Bergfahrer bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten schneller zu Berg und dadurch wirtschaftlicher fahren kann. Abbildung 5-10 stellt die Zonenauswertung der entwickelten Gesamtpotentiale (Mittelwert) zu Tal über den Streckenabschnitt in der Fahrrinne dar. Im Verlauf der Gesamtpotentiale ist auch hier der Übergang vom Rheingau in die Gebirgsstrecke ab etwa Rhein-km 529 erkennbar, begründet in den vorhandenen höheren Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 5-7 in Kapitel 5.1.4). Bei Niedrig- bis Hochwassermarken I (PK050 bis PK460) beträgt der Mittelwert des mittleren Gesamtpotentials aus der Fahrrinnenzonenauswertung über den Streckenabschnitt zwischen 68 und 73. Erst bei Hochwassermarken II (PK640) steigt der Mittelwert auf etwa 80 aufgrund der vergleichsweise stärker zunehmenden Fließgeschwindigkeiten.

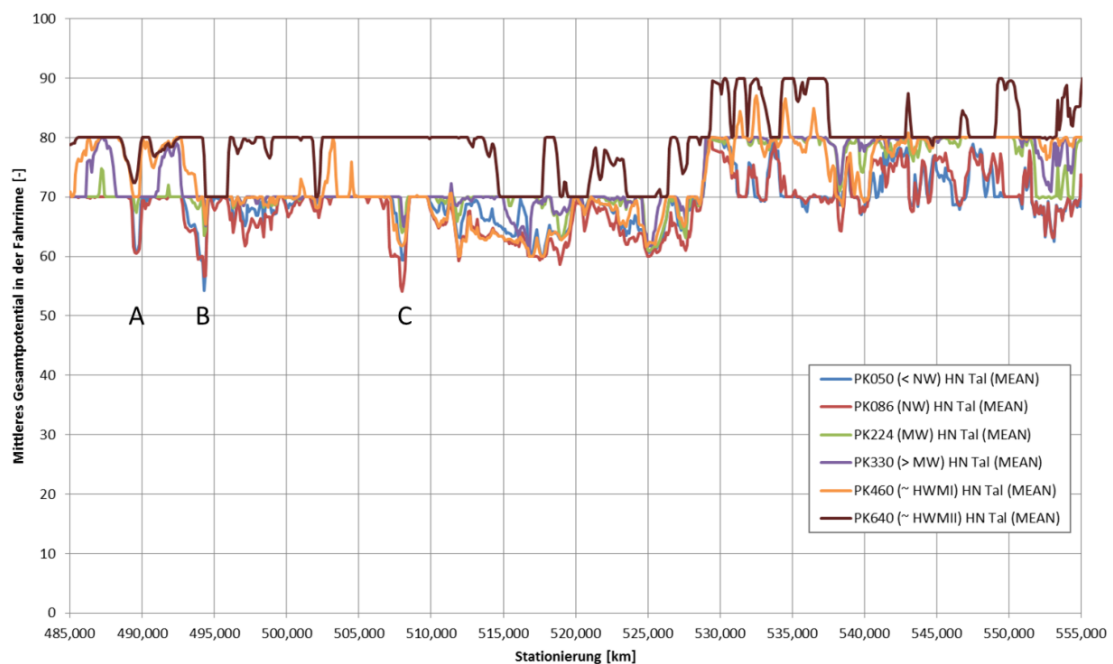


Abbildung 5-10: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen

Aus der Betrachtung der Minimalwerte können sogenannte Engstellen im Fahrrinnenbereich über den untersuchten Streckenabschnitt lokalisiert werden, aber auch die Betrachtung der Mittelwerte gibt bereits Hinweise auf Einschränkungen im Fahrrinnenbereich (siehe (A), (B) und (C) in Abbildung 5-10). Abbildung 5-11 stellt exemplarisch das Gesamtpotential bei Niedrigwasser bei Rhein-km 489,6 (A) (Ginsheimer Leyen), Rhein-km 494,4 (B) (Geschiebefang Mainz-Weisenau) und Rhein-km 508,1 (C)

dar. Dieses Vorgehen kann z. B. bereits für die Wassertiefen aus deren Einzelpotentialen durchgeführt werden, um abflussabhängig Tiefenengpässe zu identifizieren (Kapitel 5.2.3).

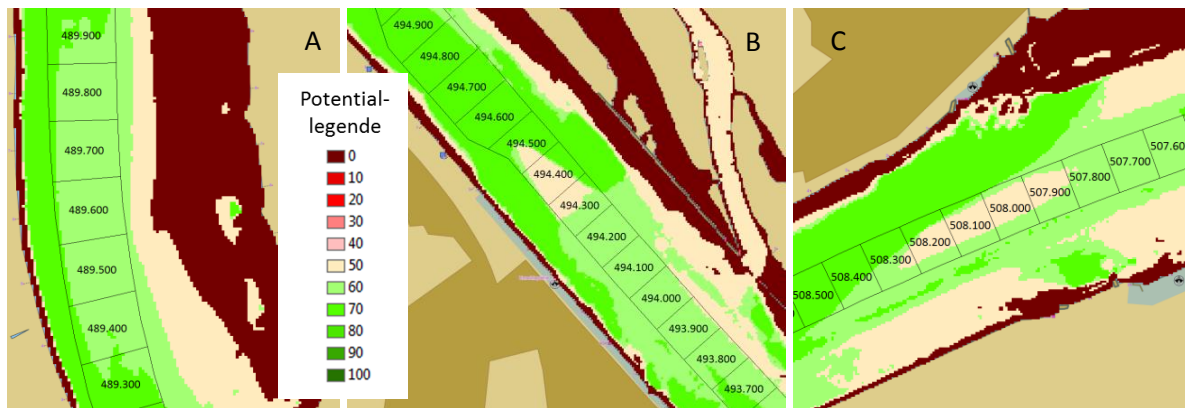


Abbildung 5-11: Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrigwasser (PK086) für Rhein-km 489,6 (A), Rhein-km 494,4 (B) und Rhein-km 508,1 (C)

Die Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrinne ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Exemplarisch wurde bei der Verteilung der Wichtungsfaktoren zu Berg die Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe mit 0,5 gleich gewichtet. Hier ist die Trennung zwischen dem Rheingau und der Gebirgsstrecke noch deutlicher zu erkennen, da die Fließgeschwindigkeiten für einen Bergfahrer in der Gesamtpotentialentwicklung vergleichsweise stärker eingehen. Die Mittelwerte der Gesamtpotentiale in der Fahrinne im gesamten Streckenabschnitt belaufen sich bei den untersuchten Abflüssen auf 69 bis 75.

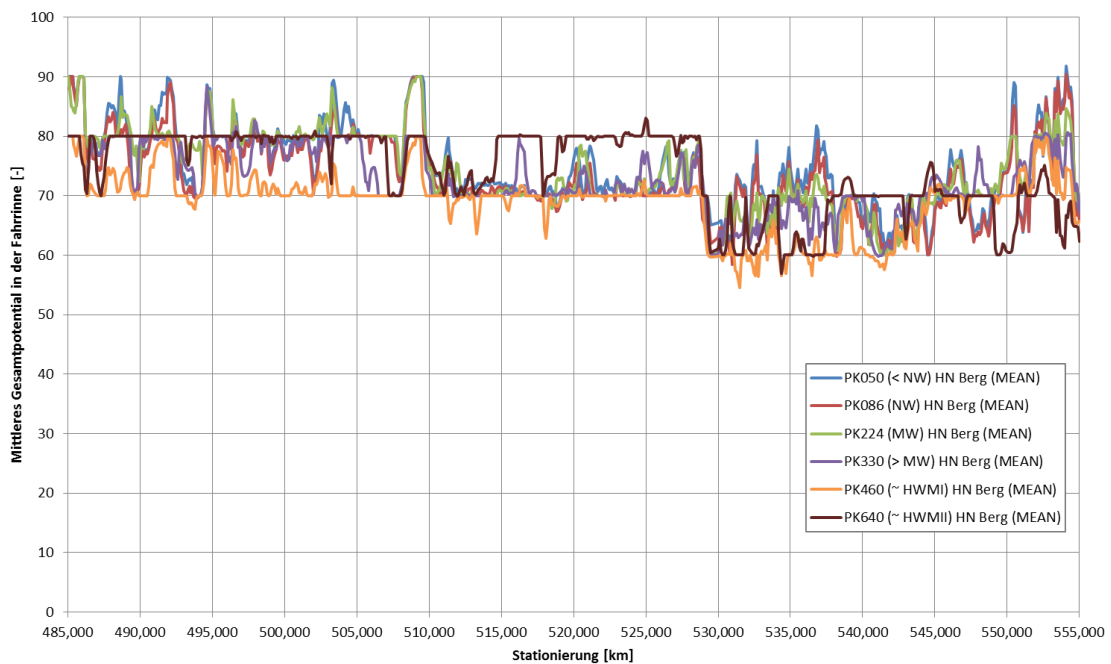


Abbildung 5-12: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrinne bei verschiedenen Abflüssen



Je nach Fragestellung und Zielsetzung werden bei der Gesamtpotentialentwicklung zusätzliche Einzelpotentiale durch Berücksichtigung der Inland ENC Objekte (siehe z. B. Kapitel 5.2.5) oder durch ergänzende Informationen wie z. B. Fahrregeln (Kapitel 5.2.6 und 5.2.7) berücksichtigt. Für die ausgewählten Objekte aus der Inland ENC (u. a. Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungsstonnen, Ponton, Pylons, Uferbauten) werden Sicherheitsabstände zwischen 5 m und 10 m gewählt. Das sind Erfahrungs- bzw. Richtwerte, sofern eine größere Sicherheit erwünscht wird, müssen die Abstände vergrößert werden oder z. B. bei der Potentialentwicklung über das distanzbasierte Verfahren ein abgestuftes Potential generiert werden. Häufig sind für Sicherheitsabstände keine direkten Vorgaben definiert, sondern lediglich Angaben wie, dass ein ausreichender Abstand vom Schiffsführer eingehalten werden muss. Die Regelung der Brückendurchfahrten zu Tal bzw. zu Berg und Stromteilungen werden bei der Potentialentwicklung durch zusätzliche Polygone an den einzelnen Brückenfeldern (Kapitel 5.2.7) bzw. der Haupt- und Seitenarme gewährleistet.

Für die Umsetzung der Verkehrsregel „geregelte Begegnung“ nach § 9.04 der RheinSchPV (WSV, 2014 [86]) werden bei der Potentialentwicklung zu Berg bzw. zu Tal die jeweilige Fahrrinnenhälfte berücksichtigt. Die Beschränkungen der Schifffahrt bei Hochwasser nach § 10.01 der RheinSchPV, dass sich die Fahrzeuge bei der Talfahrt möglichst in der Mitte und bei der Bergfahrt im mittleren Drittel des Stromes halten sollen, kann bei der Potentialentwicklung zu Tal durch die Berücksichtigung der Fahrrinnenachse und zu Berg durch das mittlere Fahrrinnendrittel entsprochen werden.

### **5.2.2 Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten**

Für eine Validierung der Potentialentwicklung werden die berechneten Gesamtpotentiale anhand der in Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 (Kapitel 5.1.5) aufgeführten Schiffsfahrten im fließenden Verkehr getrennt für die Berg- und Talfahrt sowie gemäß dem zugeordneten Abflussbereich ausgewertet. Die aufgezeichneten Schiffsfahrten können bzgl. der Lage visuell mit den Gesamtpotentialen abgeglichen oder statistische Kenngrößen (u. a. Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung) in jeder einzelnen Schiffsfläche berechnet werden. Mit der statistischen Fahrrinnenzonenauswertung in *RiNA* können Vergleiche der aufgezeichneten Fahrten gegenüber der Fahrrinne bzw. einzelner Fahrten untereinander durchgeführt und bewertet werden. Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 stellen exemplarisch die Auswertung aufgezeichneter Schiffsfahrten zu Tal bei verschiedenen Abflüssen (Niedrig-, Mittel und Hochwasser) dar. Über große Bereiche ist eine gute Übereinstimmung vorhanden. Aus Darstellungsgründen wurden die beiden Hauptachsen getauscht und die Achse des Gesamtpotentials begrenzt.

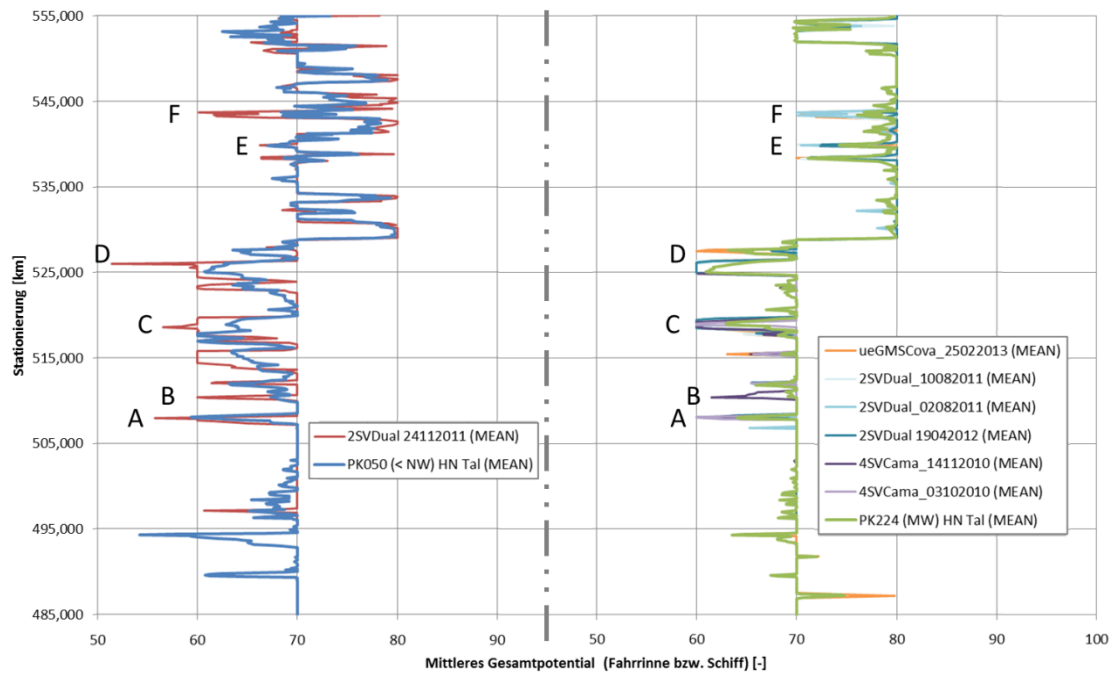


Abbildung 5-13: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrig- (PK050; links) bzw. Mittelwasser (PK224; rechts) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal

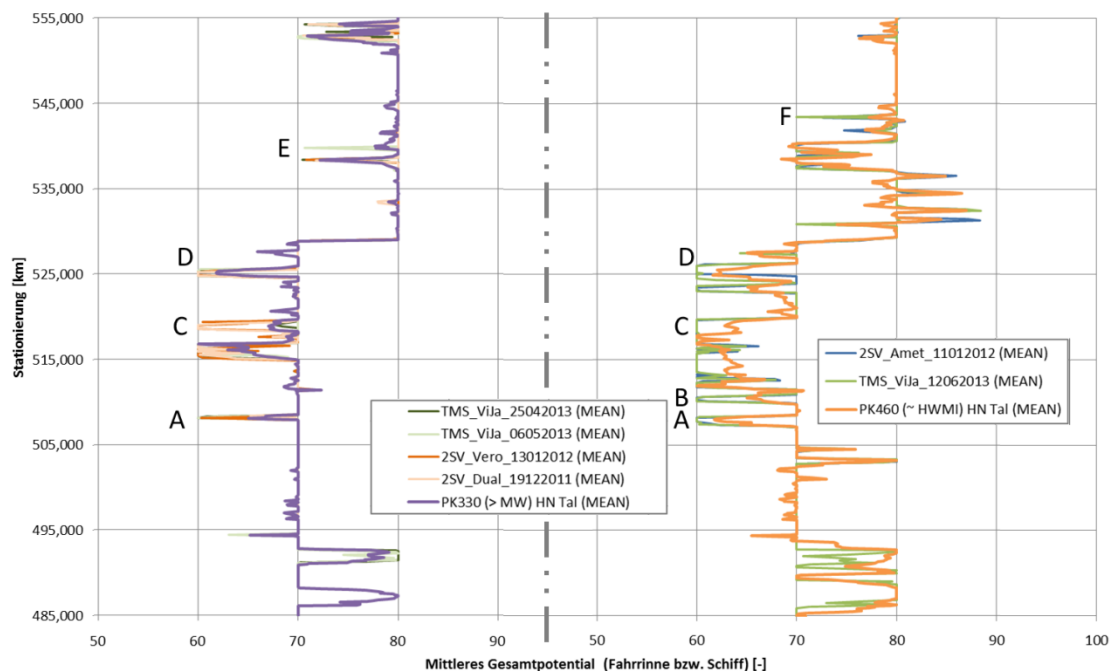


Abbildung 5-14: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal bei Mittelwasser (PK330; links) bzw. Hochwasser (PK460; rechts) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal

Basierend auf den berechneten Strömungskenngrößen und deren Gesamtpotentiale können somit vergleichende Aussagen über die Güte einer Fahrt in einem Streckenabschnitt (z. B. über die



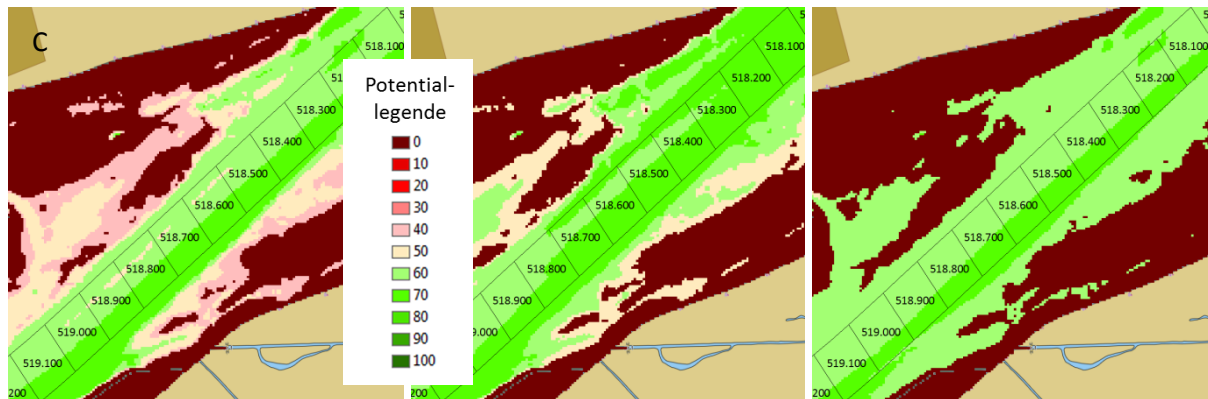


Abbildung 5-17: Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei verschiedenen Abflüssen (PK050; PK224; PK460) bei Rhein-km 518 (C)

Analysiert man die aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Berg, sind ähnliche Auffälligkeiten vorhanden (siehe Abbildung 5-18, rechts). Insbesondere werden solche Bereiche wie das Verlassen der Fahrrinne (G) oder An- und Ablegemanöver (H) schnell lokalisiert (siehe Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19).

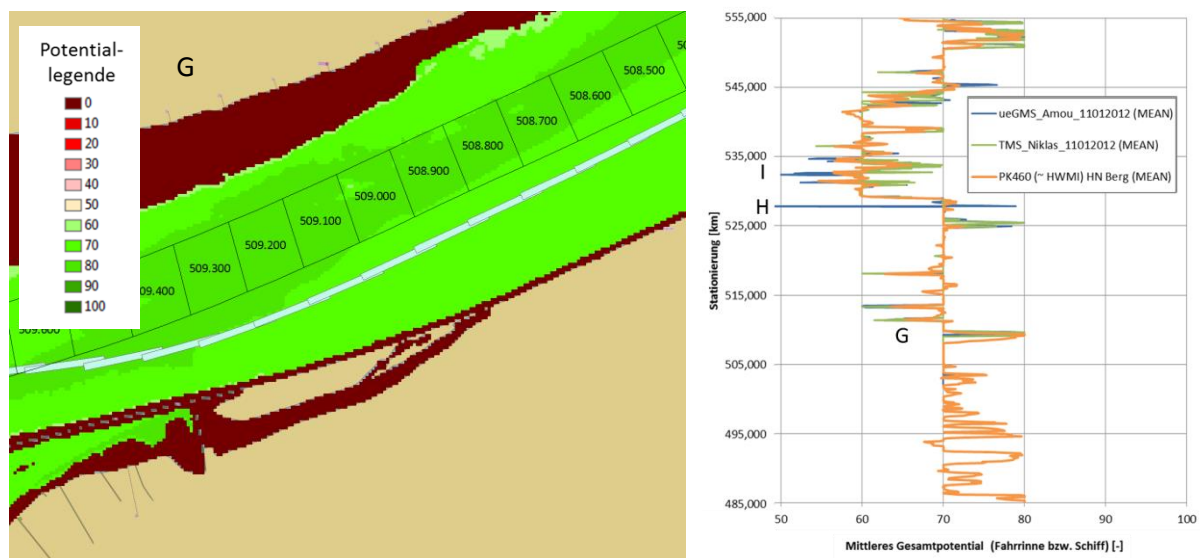


Abbildung 5-18: Vergleich einer aufgezeichneten Fahrt zu Berg bei Hochwasser bei etwa Rhein-km 509 (G; Verlassen der Fahrrinne; links) und Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg bei Hochwasser (PK460) mit aufgezeichneten Schiffsfahrten (rechts)

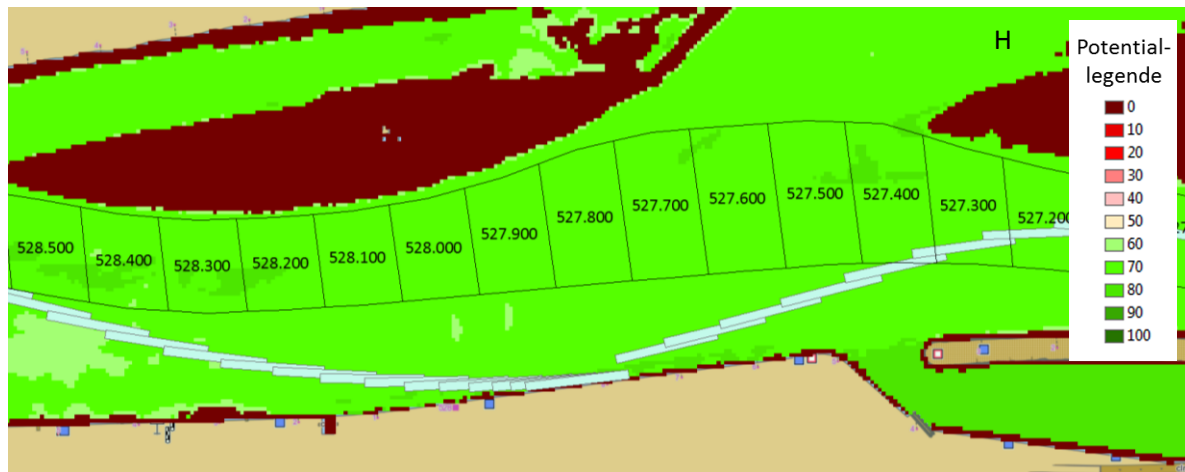


Abbildung 5-19: Vergleich einer aufgezeichneten Fahrt zu Berg bei Hochwasser (PK460) bei etwa Rhein-km 527 (H; An- und Ablegemanöver)

Auch Bereiche mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten, wie z. B. bei Rhein-km 532,5 (I) unterhalb dem „großen und kleinen Leisten“ (Untiefen), sind in der Gesamtpotentialauswertung von Schiffsfahrten identifizierbar. Abbildung 5-20 zeigt den Vergleich aufgezeichneter Schiffsfahrten zu Berg bei einem Hochwasserabfluss vor dem Hintergrund des berechneten Gesamtpotentials (links) sowie der Fließgeschwindigkeiten (rechts). Die Schiffsfahrten verlaufen durch den Bereich in der Fahrrinne mit den höchsten Fließgeschwindigkeiten von über 2,8 m/s bei Hochwasser. Die Bergfahrer halten zu den Buhnen Abstand, weil abflussabhängig die Wirkung der Querströmung an den Buhnenköpfen stark sein kann.

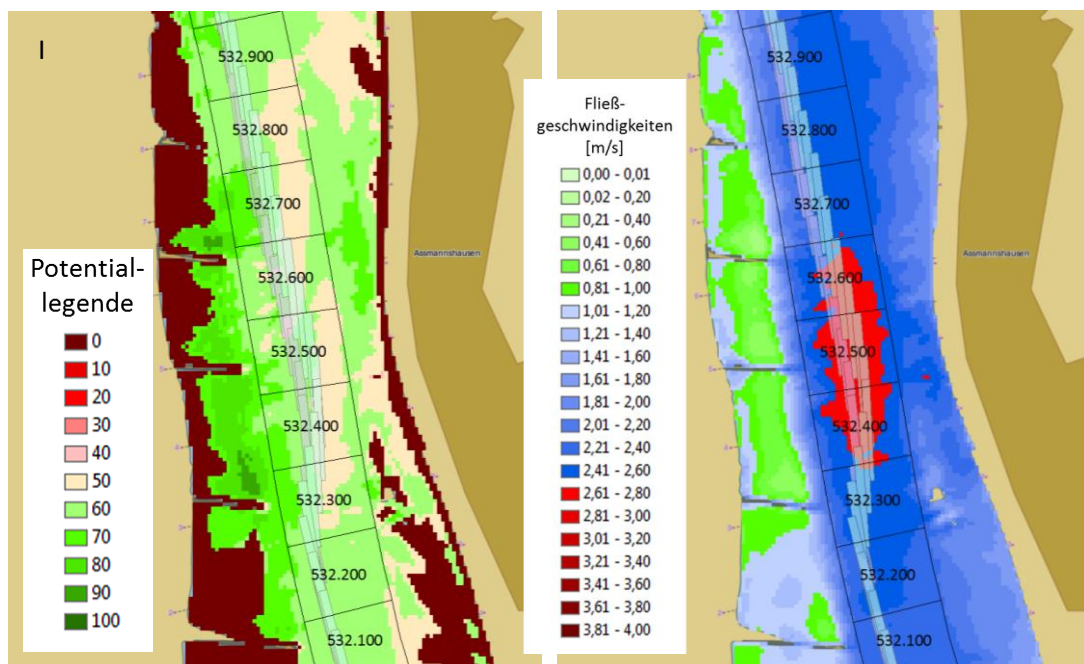


Abbildung 5-20: Gegenüberstellung des Gesamtpotentials zu Berg (links) und Darstellung der Fließgeschwindigkeiten (rechts) bei einem Hochwasserabfluss (PK460) sowie aufgezeichnete Schiffsfahrten (I)

Zusätzlich werden die aufgezeichneten Fahrten genutzt, um die Entwicklung der Gesamtpotentiale zu verbessern, indem zusätzliche Einzelpotentiale durch Berücksichtigung der Inland ENC Objekte oder durch ergänzende Informationen wie z. B. Fahrregeln generiert werden.

### 5.2.3 Variation des Tiefenanspruches

Die Befahrbarkeit einer Wasserstraße hängt vorrangig von den vorhandenen Fließtiefen (abflussabhängig) in einem Streckenabschnitt ab. Mit dem entwickelten Verfahren können vorgehaltene Fahrrinntiefen bezogen auf GLW auf einer festgelegten Fahrrinnenbreite (Kapitel 5.1.2) untersucht werden. Bei einer Variation des Tiefenanspruches der Fahrrinnenanforderungen um jeweils 30 cm bei Niedrigwasser (PK086 mit einer freigegebenen Tiefe von 1,90 m) von 1,60 m bis 2,50 m, können kritische Stellen im Streckenabschnitt aufgezeigt werden. Hierfür werden die aus den Fließtiefen berechneten Einzelpotentiale in der Talfahrt ausgewertet. Abbildung 5-21 zeigt die Entwicklung des mittleren Einzelpotentials der Fließtiefen in der Fahrrinne bei Niedrigwasser (PK086). Die bereits identifizierten Engpässe (siehe Tabelle 3-2 in Kapitel 3.2.2.4) aus dem ARGO-Probebetrieb (WSV, 2003 [82]) sind auch hier erkennbar. Bei einem Tiefenanspruch von 2,20 m beträgt der Mittelwert des mittleren Einzelpotentials in der Fahrrinne (Mittelwert aus der statistischen Zonenauswertung) des untersuchten Streckenabschnittes das Potential 90, lediglich beim Geschiebefang Mainz-Weisenau bei Rhein-km 494,4 (A) geht das Potential runter auf 58. Allerdings nimmt das Potential bei einem um 30 cm erhöhten Tiefenanspruch auf 2,50 m deutlich ab und weitere Engpässe sind lokalisierbar.

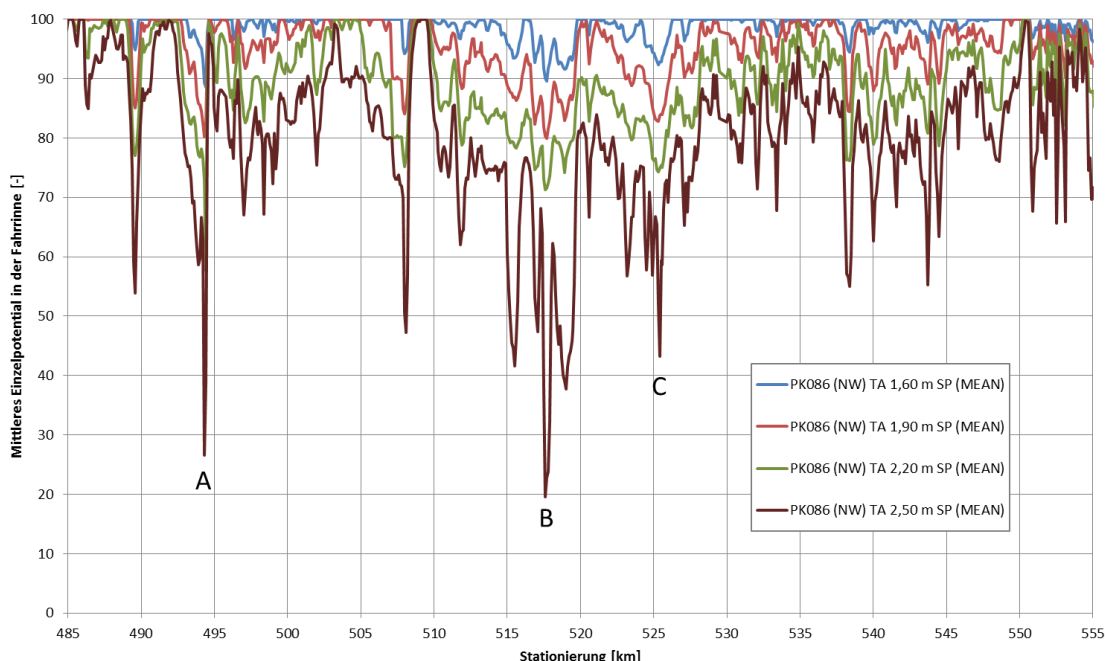


Abbildung 5-21: Veränderung des mittleren Einzelpotentials der Fließtiefen in der Fahrrinne bei der Talfahrt bei Niedrigwasser (PK086 mit 1,90 m) durch Variation des Tiefenanspruches (TA) von 1,60 m bis 2,50 m um jeweils 30 cm



Exemplarisch ist die Entwicklung des Einzelpotentials der Fließtiefen bei Niedrigwasser (PK086) bei Veränderung des Tiefenanspruches für die beiden weiteren markanten Stellen bei Rhein-km 516-518 (B) und Rhein-km 524-527 (C) in der Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 dargestellt.

Abbildung 5-22 zeigt den Bereich unterhalb der Mariannenaue, an dem die kleine und große Giess wieder zusammenführen. Bei einem Tiefenanspruch von 2,50 m ist hier großflächig die Befahrbarkeit Null und daher kein Durchkommen mehr.

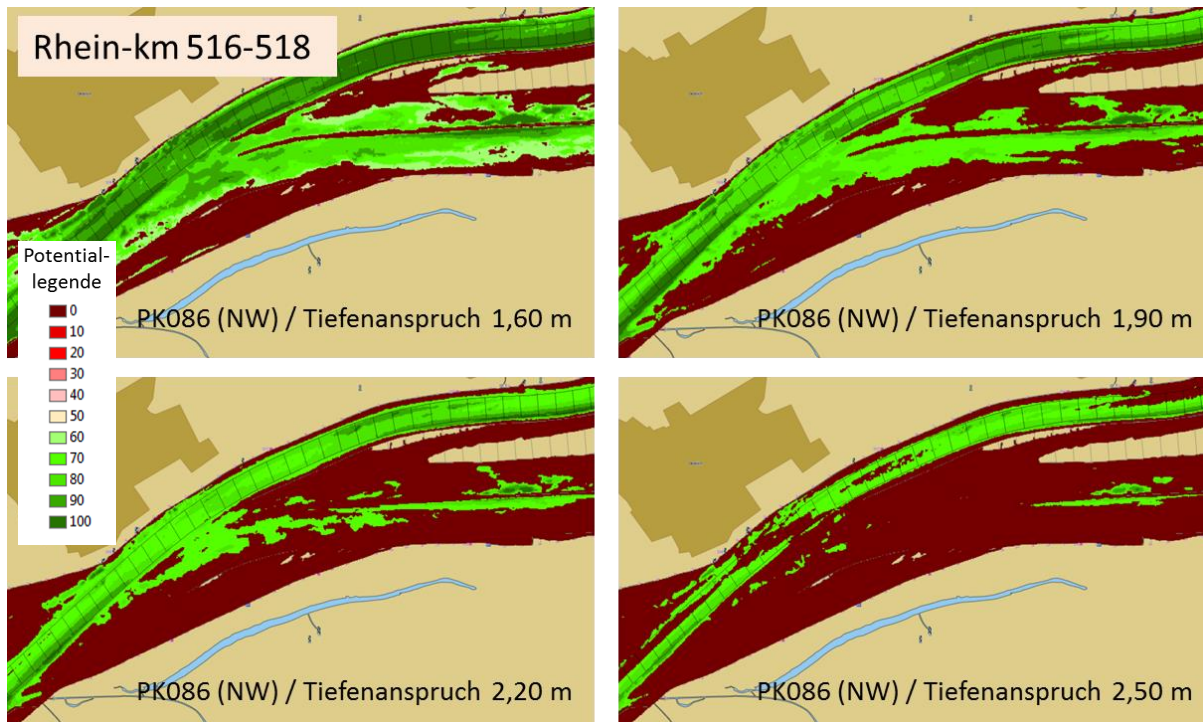


Abbildung 5-22: Darstellung des Einzelpotentials der Fließtiefen bei der Talfahrt für Rhein-km 516 bis 518 (B) bei Niedrigwasser (PK086) durch Variation des Tiefenanspruches von 1,60 m bis 2,50 m

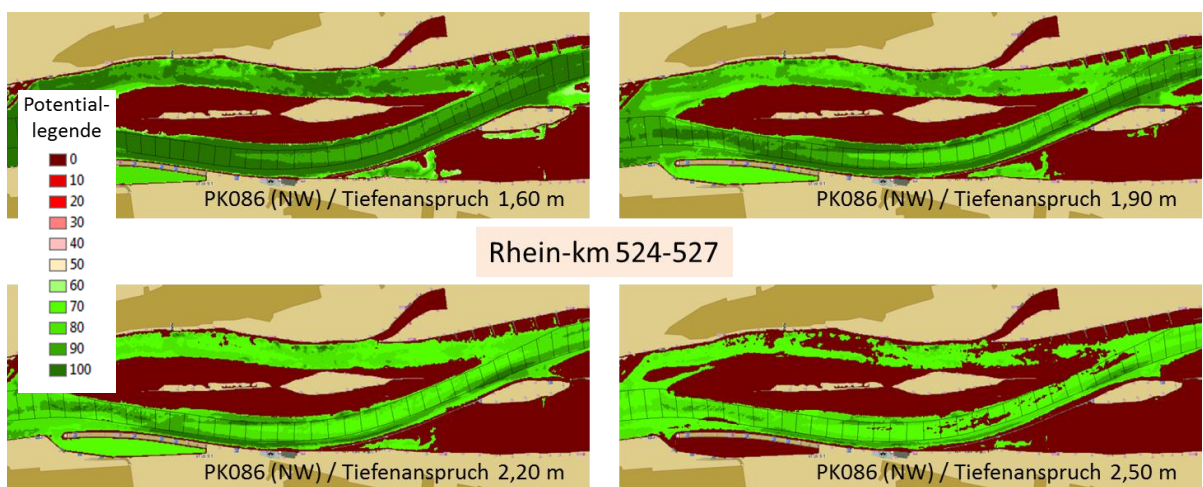


Abbildung 5-23: Darstellung des Einzelpotentials der Fließtiefen bei der Talfahrt für Rhein-km 524 bis 527 (C) bei Niedrigwasser (PK086) durch Variation des Tiefenanspruches von 1,60 m bis 2,50 m



Abbildung 5-23 zeigt den Abschnitt der Rüdesheimer Aue mit Aufteilung in Kemptener Fahrwasser mit Fahrrinne (linkes Ufer) und Rüdesheimer Fahrwasser (rechtes Ufer). Auch hier sind deutliche Einschränkungen im Fahrrinnenbereich bei einem Tiefenanspruch von 2,50 m erkennbar.

### 5.2.4 Variation der Geschwindigkeitsgrenze

Fragestellungen, wie z. B. die Ermittlung der erforderlichen Geschwindigkeit über Grund bei einem zu Berg fahrenden Schiff, um einen Streckenabschnitt zu passieren bzw. um kritische Bereiche aufzuzeigen, können mit dem Einzelpotential der Fließgeschwindigkeiten dargestellt werden. Abbildung 5-24 zeigt exemplarisch die Entwicklung des mittleren Einzelpotentials der Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne bei einem Hochwasserabfluss (PK460) in der Bergfahrt durch Veränderung der Geschwindigkeitsgrenze schrittweise um 0,3 m/s von 3,6 m/s auf 2,4 m/s. Der untersuchte Streckenabschnitt ist oberhalb der Gebirgsstrecke (ab Rhein-km 529) mit einem weniger stark motorisierten Schiff noch passierbar, allerdings innerhalb der Gebirgsstrecke sind mit abnehmender Geschwindigkeitsgrenze deutliche Einschränkungen (z. B. bei Rhein-km 529 bis 533 (A)) zu erkennen, in denen ein schwach ausgerüstetes Schiff zu Berg bei Hochwasser einzelne Streckenabschnitte nicht ohne Unterstützung passieren könnte.

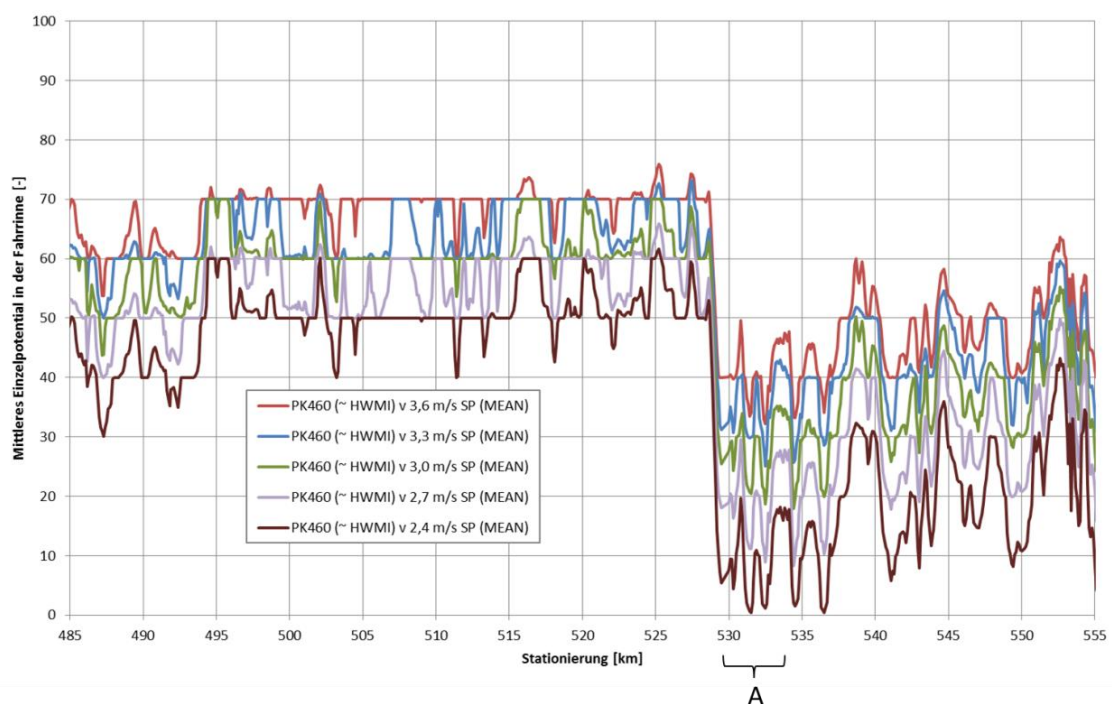


Abbildung 5-24: Veränderung des mittleren Einzelpotentials der Fließgeschwindigkeit in der Fahrrinne bei der Bergfahrt bei Hochwasser (PK460 mit 3,6 m/s) durch Variation der Geschwindigkeitsgrenze von 3,6 m/s bis 2,4 m/s um jeweils 0,3 m/s

Exemplarisch ist in Abbildung 5-25 die Veränderung des Einzelpotentials der Fließgeschwindigkeit bei der Bergfahrt für Rhein-km 529 bis 533 (A) dargestellt. Bereits bei einer Geschwindigkeitsgrenze von 2,7 m/s ist ein kleiner Bereich bei Rhein-km 532,5 innerhalb der Fahrrinne als nicht befahrbar ausgewiesen. Bei einer Geschwindigkeitsgrenze von 2,4 m/s liegen innerhalb dieses Strecken-



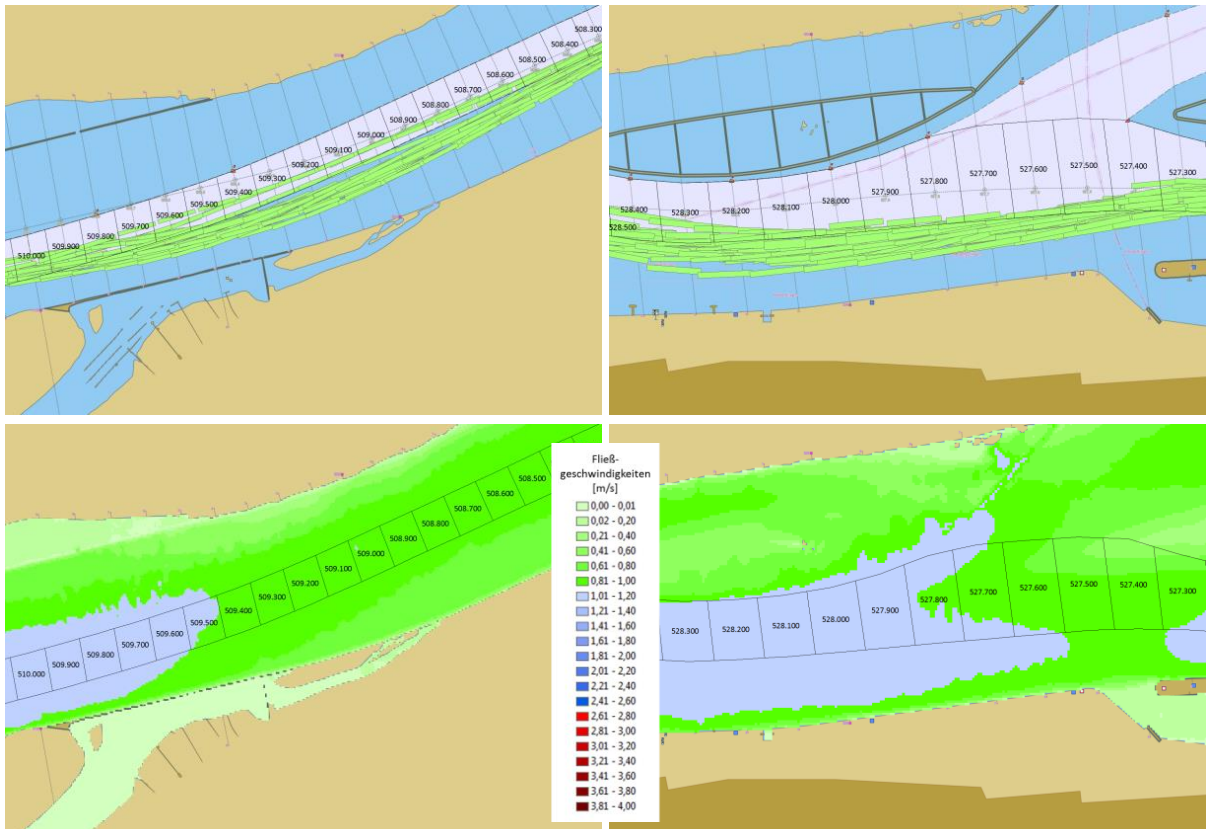


Abbildung 5-26: Darstellung der aufgezeichneten Bergfahrten (oben) und der Fließgeschwindigkeiten (bei Mittelwasser PK224, unten) bei Rhein-km 509,2 (links) und Rhein-km 528,0 (rechts)

Bei Rhein-km 528,0 kann dieses Verhalten zusätzlich durch die vorhandene Fährverbindung von Bingen nach Rüdesheim, welche vorwiegend den rechten Fahrrinnenbereich nutzt, begründet werden. Aus diesem Anlass kann bei der Gesamtpotentialentwicklung ein zusätzliches Einzelpotential aus dem Inland ENC Objekt „Fährweg“ generiert und das Gesamtpotential abgeschwächt werden (siehe Abbildung 5-27).

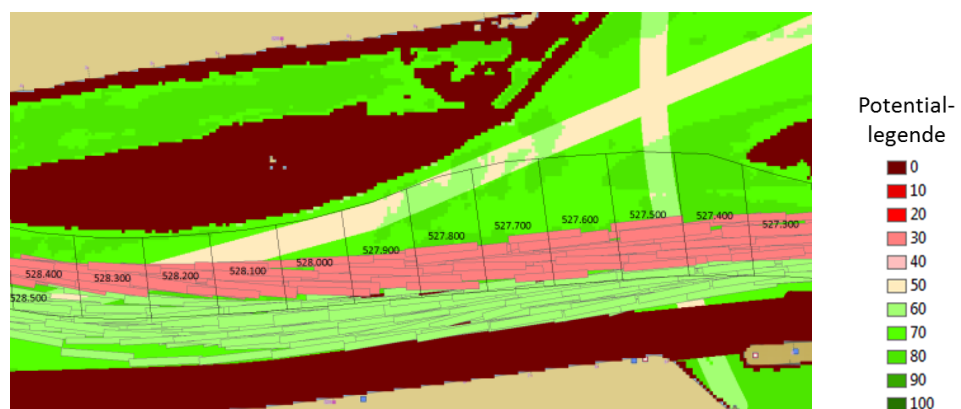


Abbildung 5-27: Kombiniertes Gesamtpotential aus Strömungskenngrößen (bei Mittelwasser PK224) und Inland ENC Objekten und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten der Bergfahrt (grün) und Talfahrt (rot) bei Rhein-km 528,0

Die in der Inland ENC ausgewiesenen Liegestellen wurden bei der Gesamtpotentialentwicklung ebenfalls mit berücksichtigt. Ergänzend sind die aufgezeichneten Schiffsfahrten aus der Berg- (grün) und Talfahrt (rot) in der Abbildung bei Rhein-km 528,0 dargestellt. Ergänzend sei erwähnt, dass Personen- und Autofähren der Schifffahrt eigentlich ausweichen müssen und das Fahrverhalten der Großschifffahrt eigentlich nicht beeinflussen dürfen.

### 5.2.6 Untersuchung der Fahrrinnenteilung am Geisenrücken

Am Geisenrücken bei etwa Rhein-km 552,3 teilt sich der Mittelrheinabschnitt in einen rechten und linken Hauptarm (siehe Abbildung 5-28). Schiffe zu Tal (rot) haben die Erlaubnis im rechten Hauptarm zu fahren und Schiffe zu Berg (grün) dürfen im rechten sowie im linken Hauptarm fahren. Dies erfordert bei der Erstellung der Befahrbarkeitspotentiale eine zusätzliche Berücksichtigung dieser Fahrregel getrennt für die Berg- und Talfahrt, d. h. für die Talfahrt wird ein zusätzliches „Flächen-Shapefile“ (Polygon) berücksichtigt und somit der linke Hauptarm gesperrt.

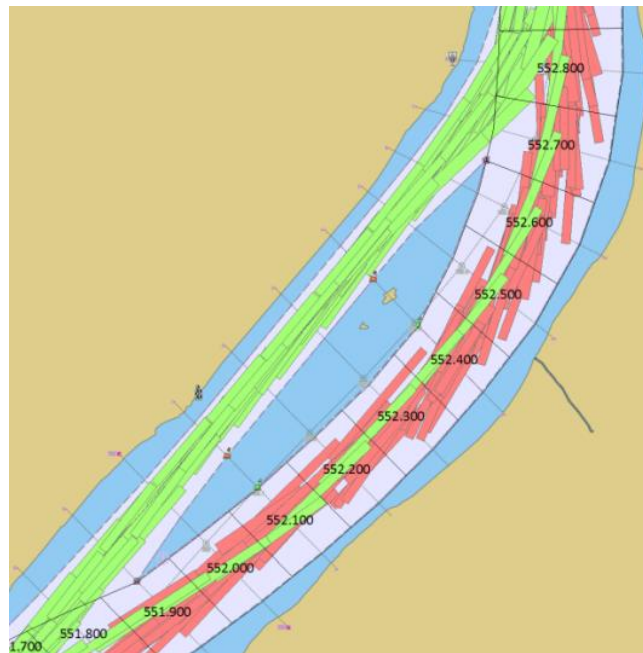


Abbildung 5-28: Darstellung der aufgezeichneten Talfahrten (rot) und Bergfahrten (grün) im Bereich des Geisenrückens bei Rhein-km 552,3 für verschiedene Schiffstypen und Abflussbereiche

Von den 18 aufgezeichneten Bergfahrten weicht ein Bergfahrer auf den rechten Hauptarm aus und nimmt durch die leichte Außenkrümmung eine längere Wegstrecke in Kauf (siehe Abbildung 5-28, grüne Schiffsphasen im rechten Hauptarm).

Bei detaillierter Betrachtung handelt es sich bei diesem Bergfahrer um einen Schubverband mit 1,70 m Abladetiefe. Somit bleiben, bei dem vorhandenen Niedrigwasserabfluss (PK086 mit einem Tiefenanspruch von 1,90 m), nur 20 cm als Sicherheitsmarge für Squat, Flottwasser und Sicherheitszuschlag. Betrachtet man in Abbildung 5-29 die Entwicklung der berechneten Gesamtpotentiale zu Berg bei diesem Niedrigwasserabfluss (PK086) mit einem Tiefenanspruch von 1,90 m (links), 2,20 m

(mitte) und 2,50 m (rechts), bestätigen die Gesamtpotentiale die Wahl des Schiffsführers bei diesem Abfluss im rechten Hauptarm zu Berg zu fahren.

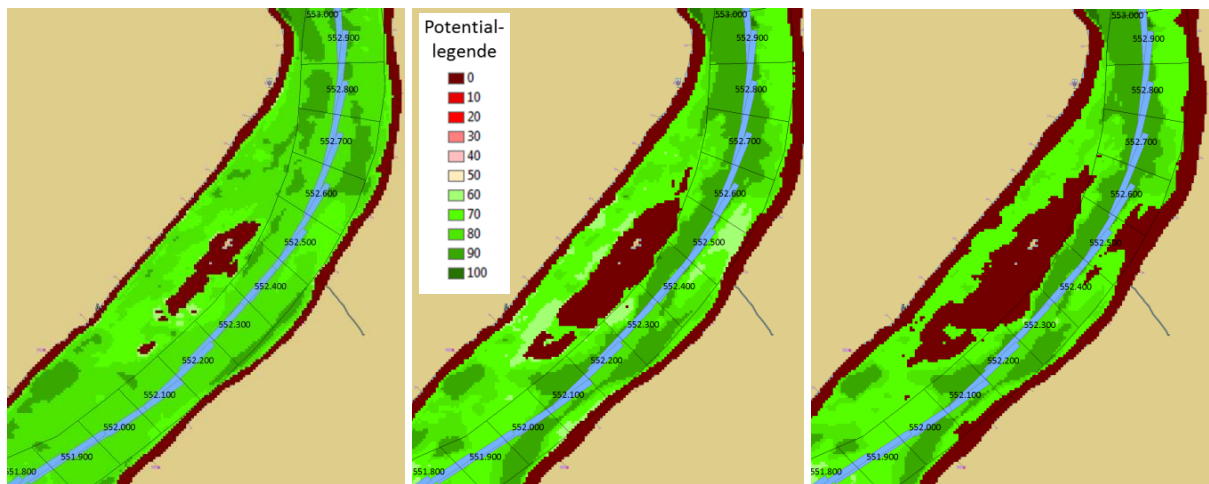


Abbildung 5-29: Darstellung der ermittelten Gesamtpotentiale zu Berg bei Niedrigwasser (PK086) bei einem Tiefenanspruch von 1,90 m (links), 2,20 m (mitte) und 2,50 m (rechts)

### 5.2.7 Berücksichtigung von Brücken in der Potentialentwicklung

Um Brückenpfeiler bei der Gesamtpotentialentwicklung zu berücksichtigen, existieren verschiedene Optionen. Zum einen können die Brückenpfeiler durch ein Nullpotential komplett blockiert und ggf. zuvor durch einen Sicherheitsabstand beaufschlagt werden. Zum anderen kann bei dem abgestuften Verfahren das Nullpotential mit zunehmendem Abstand zum Pfeiler erhöht werden. Das Gesamtpotential (siehe Abbildung 5-30) besteht aus einer Kombination der Minimumwerte aus dem Einzelpotential der Brückenpfeiler und dem zuvor entwickelten Potential aus den Strömungskenngrößen getrennt für die Tal- (links) und Bergfahrt (rechts) exemplarisch bei einem Mittelwasserabfluss (PK330).

Durch vorherige Aggregation der Inland ENC-Objekte (z. B. alle Brückenpfeiler aus mehreren Inland ENC Karten von Rhein-km 480 bis 550) kann die Potentialentwicklung für alle Brücken in einem Zuge im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden (siehe Abbildung 5-31). Voraussetzungen sind eine einheitliche Vergabe der Sicherheitsabstände und Wahl der Potentialentwicklungsverfahren bzw. Vergabe der Potentialwerte.



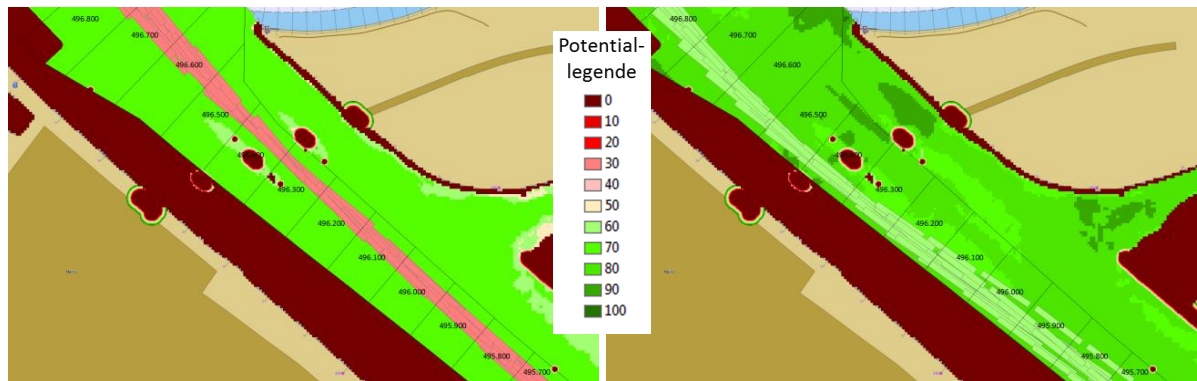


Abbildung 5-30: Entwicklung eines Gesamtpotentials aus Strömungskenngrößen bei Mittelwasser (PK330) und einigen Inland ENC-Objekten (wie z. B. Brückenpfeiler, Liegestellen, Fahrinnenbegrenzungen, Ponton, Uferbauten, Ankerplatzbereich) sowie Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten im Bereich einer Brückendurchfahrt bei Rhein-km 496,4 für die Tal- (links) und Bergfahrt (rechts)

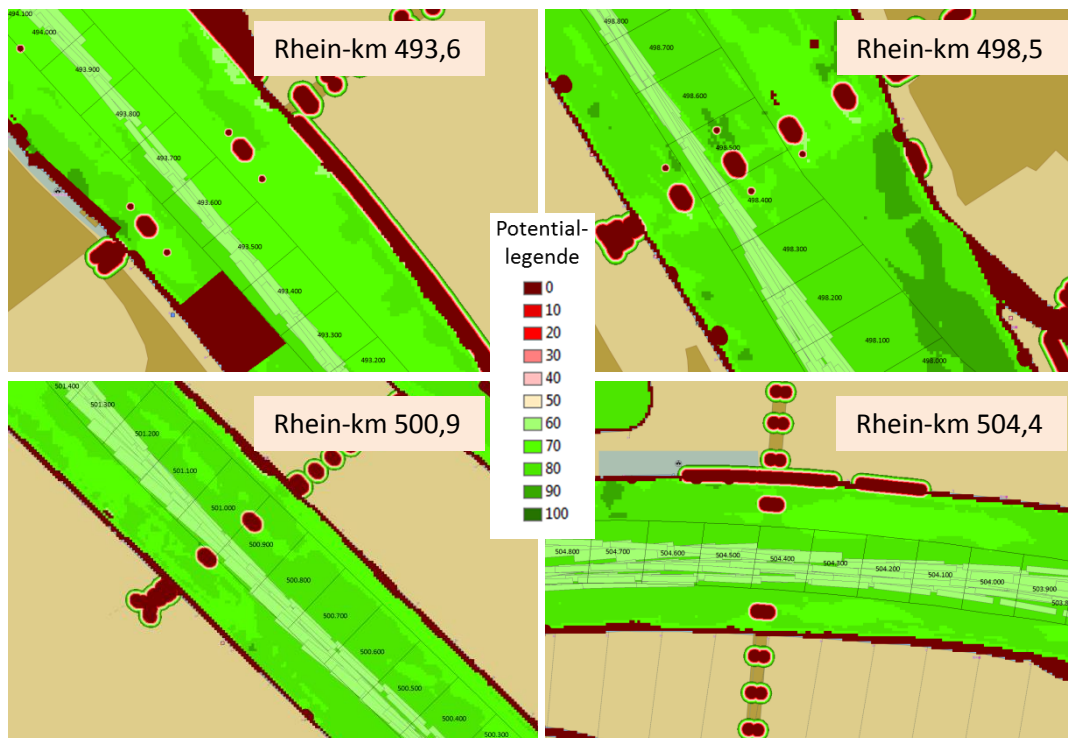


Abbildung 5-31: Entwicklung eines Gesamtpotentials aus Strömungskenngrößen bei Mittelwasser (PK330) und einigen Inland ENC-Objekten (wie z. B. Brückenpfeiler, Liegestellen, Fahrinnenbegrenzungen, Ponton, Uferbauten, Ankerplatzbereich) sowie Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten in der Bergfahrt im Bereich weiterer Brückendurchfahrten bei Rhein-km 493,6; 498,5; 500,9 und 504,4

Wird das Gesamtpotential für die Entwicklung einer Basisleitlinie (Kapitel 5.3.3) verwendet, sind zusätzliche „Flächen-Shapefiles“ (Polygone) im Brückenbereich empfehlenswert, in denen die Durchfahrt einzelner Brückenfelder getrennt für die Tal- und Bergfahrt geregelt wird. Exemplarisch ist die Gesamtpotentialentwicklung im Bereich der Eisenbahnbrücke bei Rhein-km 496,4 (siehe Abbildung 5-32) dargestellt und mit aufgezeichneten Schiffsfahrten überlagert.

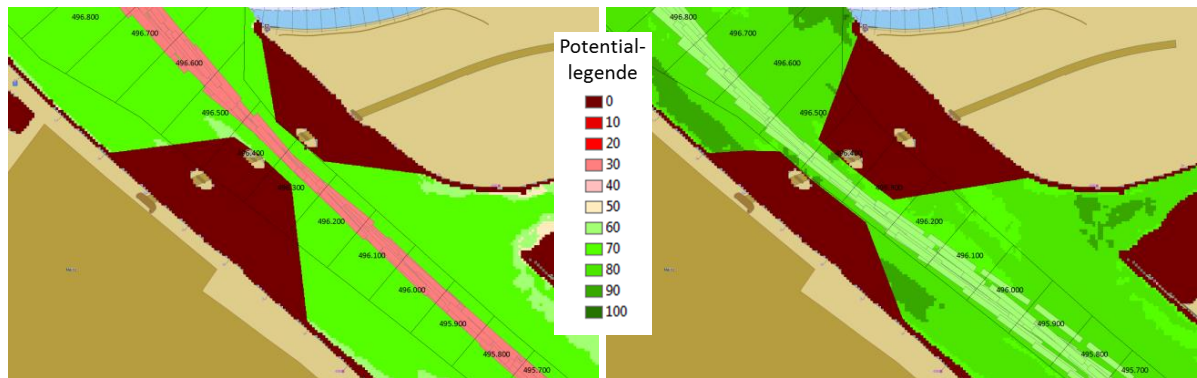


Abbildung 5-32: Alternative Gesamtpotentialentwicklung aus Strömungskenngrößen und gesonderten Einzelpotentialen zur Berücksichtigung der Brückendurchfahrtsregeln bei Rhein-km 496,4 zu Tal- (links) und Berg (rechts) sowie Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten bei Mittelwasser (PK330)

### 5.2.8 Berücksichtigung von Querströmungen in der Potentialentwicklung

Betrachtet man die aufgezeichneten Schiffsfahrten bei etwa Rhein-km 518, erkennt man, dass sowohl in der Berg- als auch in der Talfahrt, der linke Fahrrinnenrand angehalten wird (siehe Abbildung 5-33). Anhand der Gesamtpotentiale ist dieses Verhalten nicht erklärbar. Es handelt sich um den Zusammenfluss der kleinen und großen Giess unterhalb der Mariannenaue.

Abbildung 5-34 stellt exemplarisch die Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser (PK460) dar. Um in der Talfahrt den Versatz des Schiffes durch die Strömung zu kompensieren, wechseln die Schiffsführer im ungestörten Verkehr rechtzeitig die Fahrrinnenhälfte und halten den linken Fahrrinnenrand an. Die Bergfahrer bleiben ebenfalls am linken Fahrrinnenrand.

Um das geschilderte Verhalten bei der Gesamtpotentialentwicklung zu berücksichtigen, wurden Überlegungen angestellt, die Querströmungsanteile der Fließgeschwindigkeit auf die Fahrrinnenachse zu berechnen und in Einzelpotentiale umzuwandeln. Abbildung 5-35 stellt exemplarisch die auf die Fahrrinnenachse berechneten Querströmungsanteile der Fließgeschwindigkeiten zu Tal dar. Die Umrechnung der Fließgeschwindigkeiten aus dem Strömungsraster wurde in der Fahrrinnenachse und in einem seitlich begrenzten Bereich um diese Achse (z. B. bei der Fahrrinnenzonenauswertung mind. halbe Fahrrinnenbreite oder bei der Auswertung der Bahnkurven mind. die halbe Fahrspurbbreite) durchgeführt. Unterhalb der Mariannenaue sind in diesem Bereich mit Querströmungsgeschwindigkeiten bis über 0,3 m/s bei Hochwasser in der Fahrrinnenachse zu rechnen.



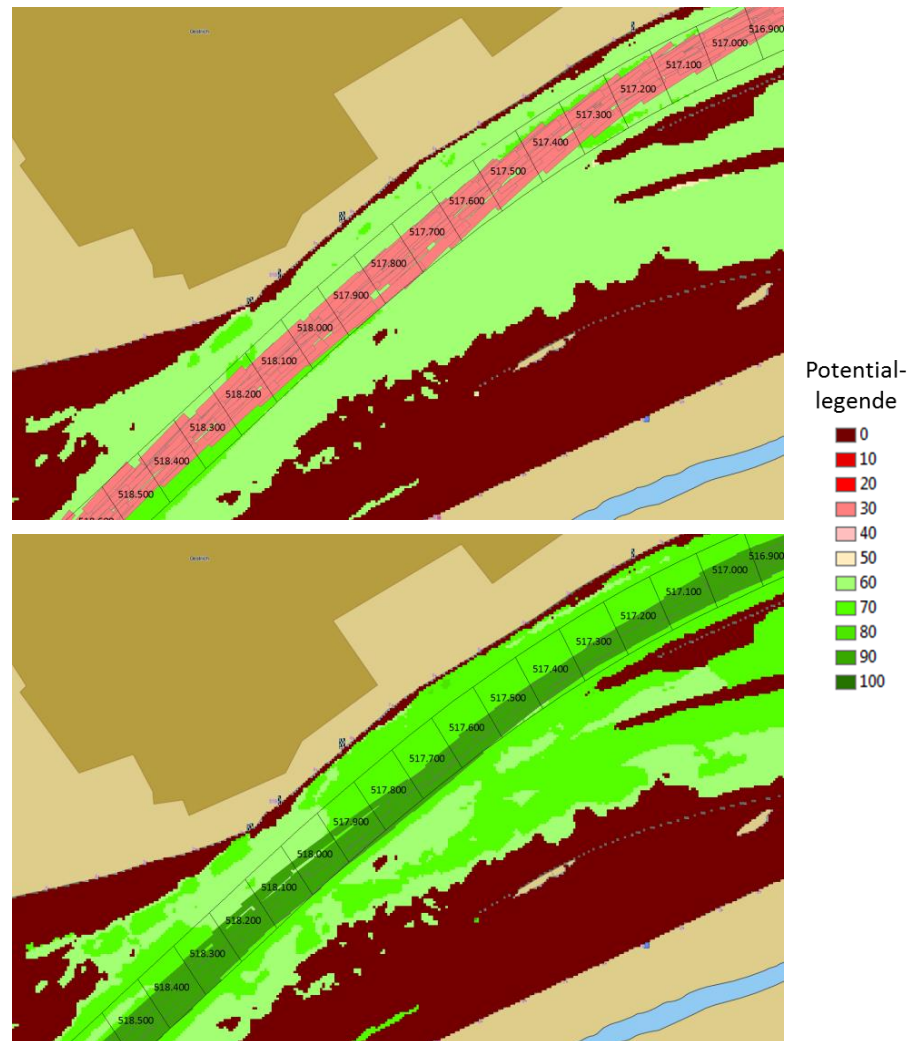


Abbildung 5-33: Darstellung der berechneten Gesamtpotentiale bei Hochwasser (PK460) zu Tal (oben) und zu Berg (unten) bei etwa Rhein-km 518 und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten

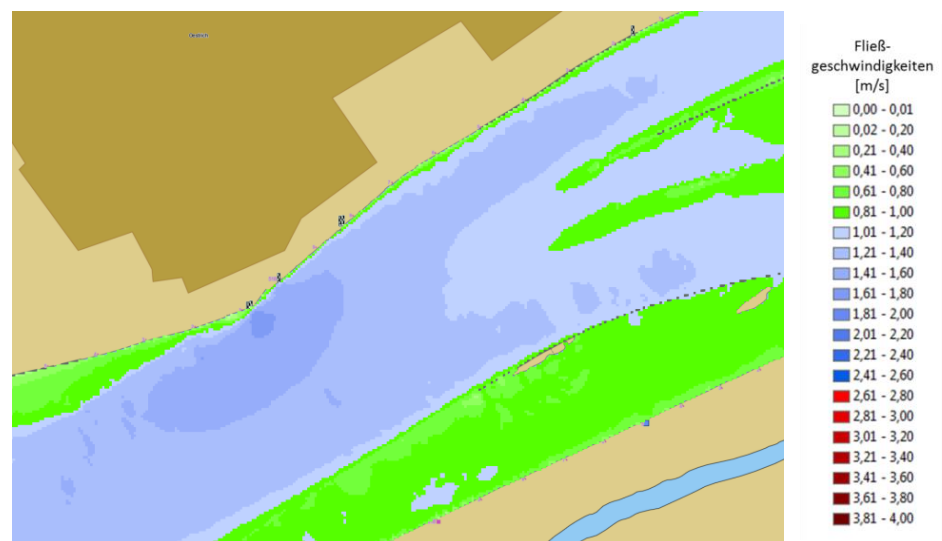


Abbildung 5-34: Darstellung der Fließgeschwindigkeiten bei etwa Rhein-km 518 bei Hochwasser (PK460)

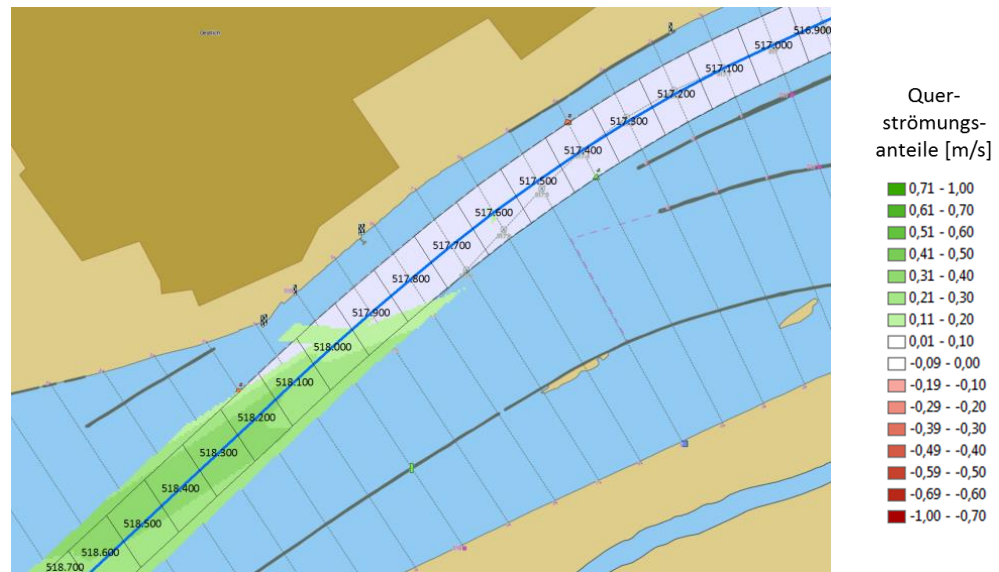


Abbildung 5-35: Darstellung der berechneten Querströmungsanteile der Fließgeschwindigkeit auf die Fahrrinnenachse (Tal) bei etwa Rhein-km 518 bei Hochwasser (PK460)

In Abbildung 5-36 wurden die Querströmungsanteile der Fließgeschwindigkeit auf die Fahrrinnenachse statistisch ausgewertet und im Untersuchungsgebiet dargestellt. Querströmungsanteile größer 0,1 m/s können markanten Stellen am Rhein, wie z. B. Kurvenbereichen, Zuflüssen, Gründen, Fahrrinnenteilungen oder Rheininseln (Werthe) zugeordnet werden. Aus den Querströmungsanteilen automatisiert Zusatzpotentiale in Form von Fahrregeln abzuleiten ist allerdings nicht trivial, da das Verhalten abflussabhängig sein kann, häufig vorausschauend auftritt und nicht immer eindeutig zuzuordnen ist.

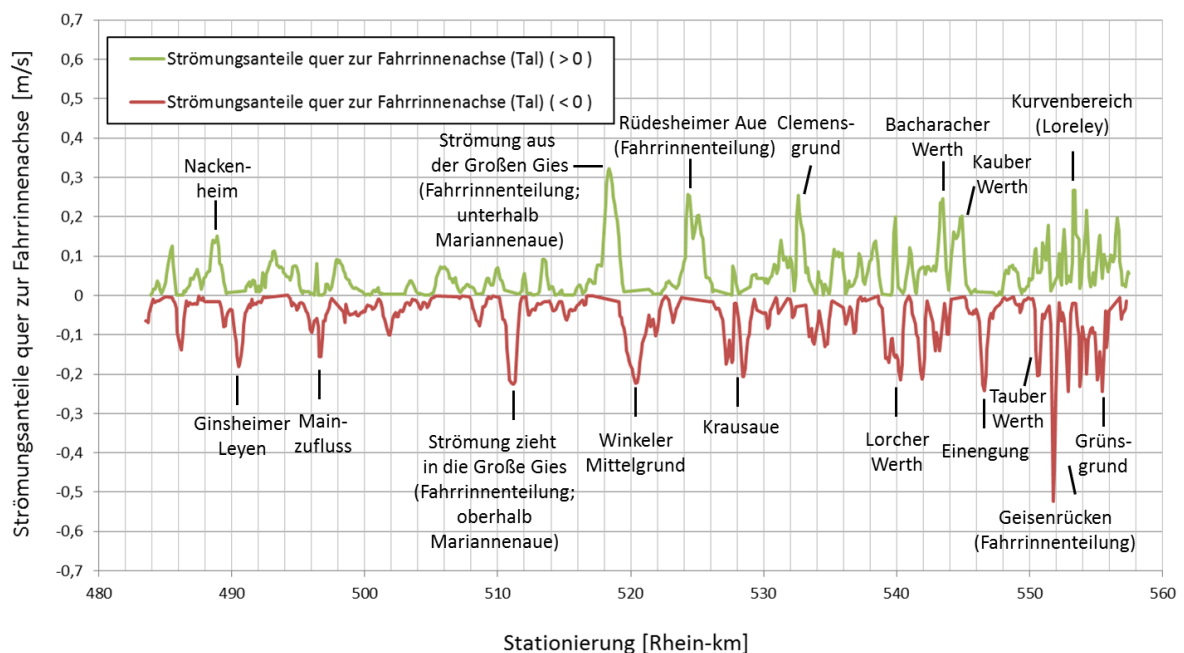


Abbildung 5-36: Berechnete Strömungsanteile quer zur Fahrrinnenachse bei Hochwasser (PK460)

Exemplarisch sind in Abbildung 5-37 die stark wechselnden Querströmungsanteile zwischen Rhein-km 553 und 556 dargestellt (links) und mit den aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal (rot) und Berg (grün) überlagert (rechts). Trotz starken Querströmungseinflüssen wird in diesem Bereich nicht der rechte bzw. linke Fahrrinnenrand oder -hälfte bei der Berg- bzw. Talfahrt, sondern aufgrund der stark wechselnden Querströmungsanteilen eher das mittlere Fahrrinnendrittel angehalten, was die Überschneidungen der Schiffsphasen belegen.

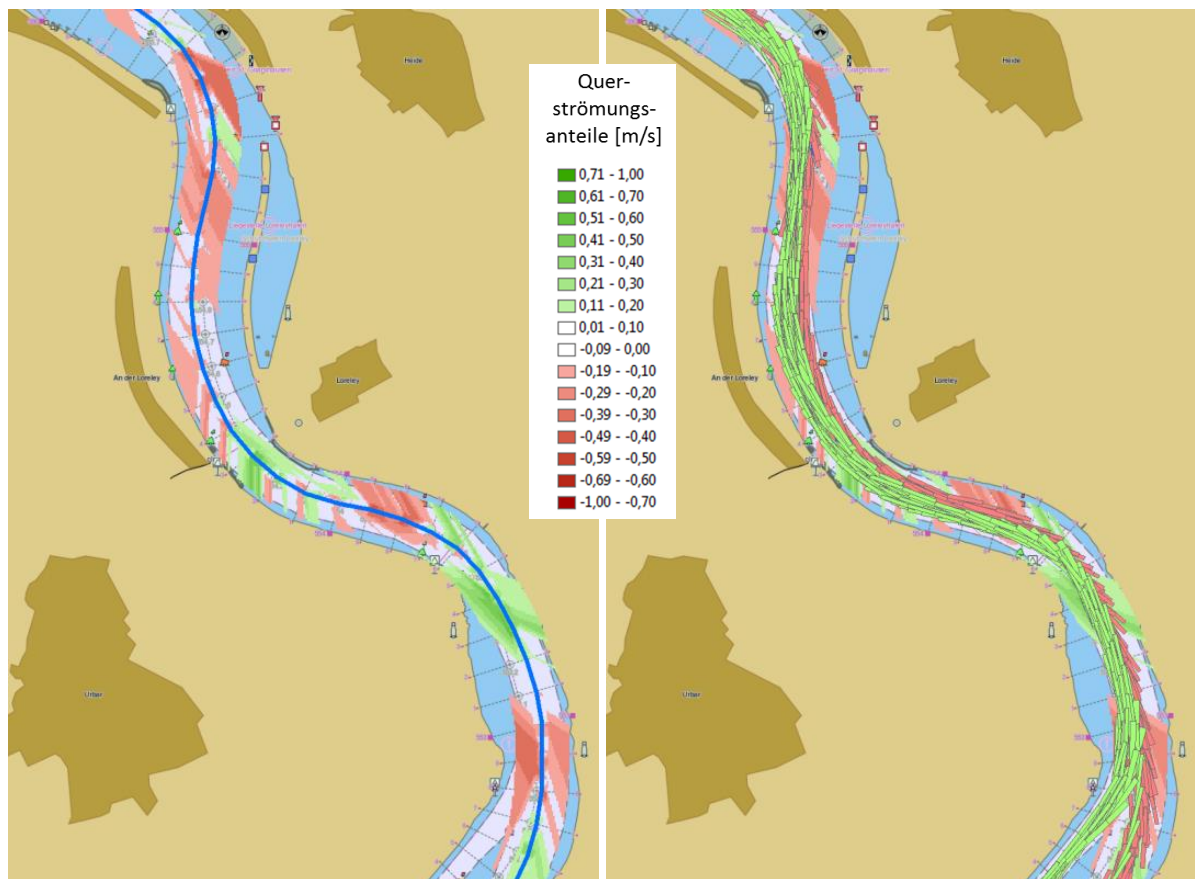


Abbildung 5-37: Flächige Darstellung der Querströmungsanteile zu Tal auf die Fahrrinnenachse bei Hochwasser (PK460, links) zwischen Rhein-km 553 bis 556 und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten (rechts) zu Tal (rot) und Berg (grün)

Führt man die Berechnung der Querströmungsanteile auf eine gefahrene Bahnkurve durch und vergleicht den Verlauf mit den ausgewerteten Driftwinkeln, so treten bei den größten Driftwinkeln auch die größten Querströmungsanteile auf. Abbildung 5-38 stellt die kombinierte Auswertung für ein TMS (oben) und einen 2SV (unten) in der Talfahrt bei Hochwasser (PK460) exemplarisch dar. Die größten Driftwinkel ( $6^\circ$  bis  $16^\circ$ ) und Querströmungen (über 0,3 m/s) sind in der Gebirgsstrecke vorhanden.

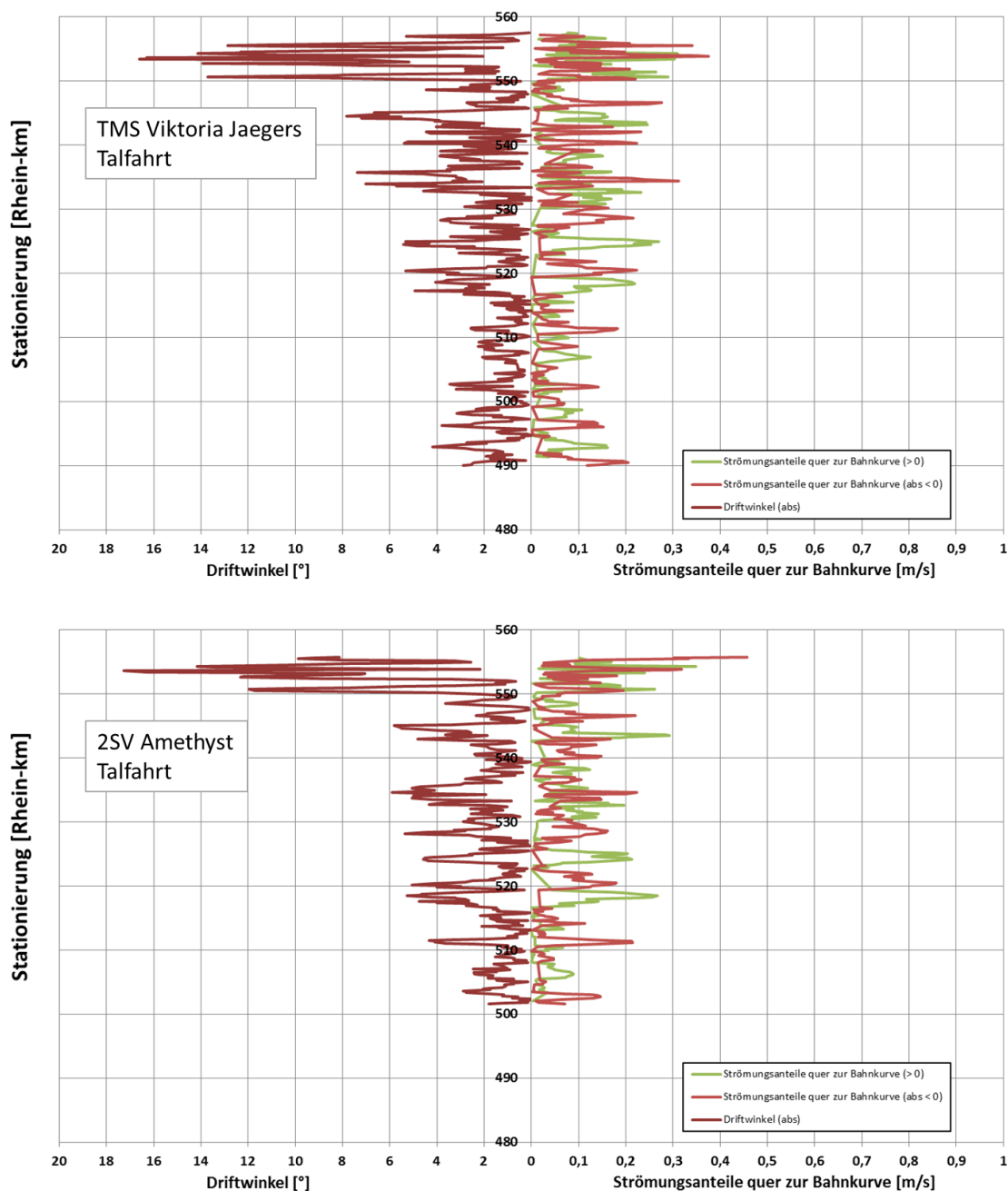


Abbildung 5-38: Kombinierte Darstellung der Auswertung der Querströmungsanteile auf die Bahnkurve und der Driftwinkel auswertung eines TMS (oben) und eines 2SV (unten) bei Hochwasser (PK460) in der Talfahrt

Analog zeigt Abbildung 5-39 die berechneten Querströmungsanteile auf eine gefahrene Bahnkurve eines TMS (oben) und eines üGMS (unten) in der Bergfahrt bei Hochwasser (PK460) und stellt den Driftwinkelverlauf gegenüber. In der Bergfahrt treten größere Querströmungsanteile (über 0,5 m/s) auf, aber vergleichsweise homogenere Driftwinkelverläufe mit kleineren Driftwinkeln (zwischen 6° bis 12°). Allerdings ist es in der Bergfahrt nicht so eindeutig wie in der Talfahrt, dass die großen Driftwinkel bei großen Querströmungen vorhanden sind, da in der Bergfahrt die Querströmungen auch genutzt werden, um vergleichsweise kleinere Driftwinkel fahren zu können.

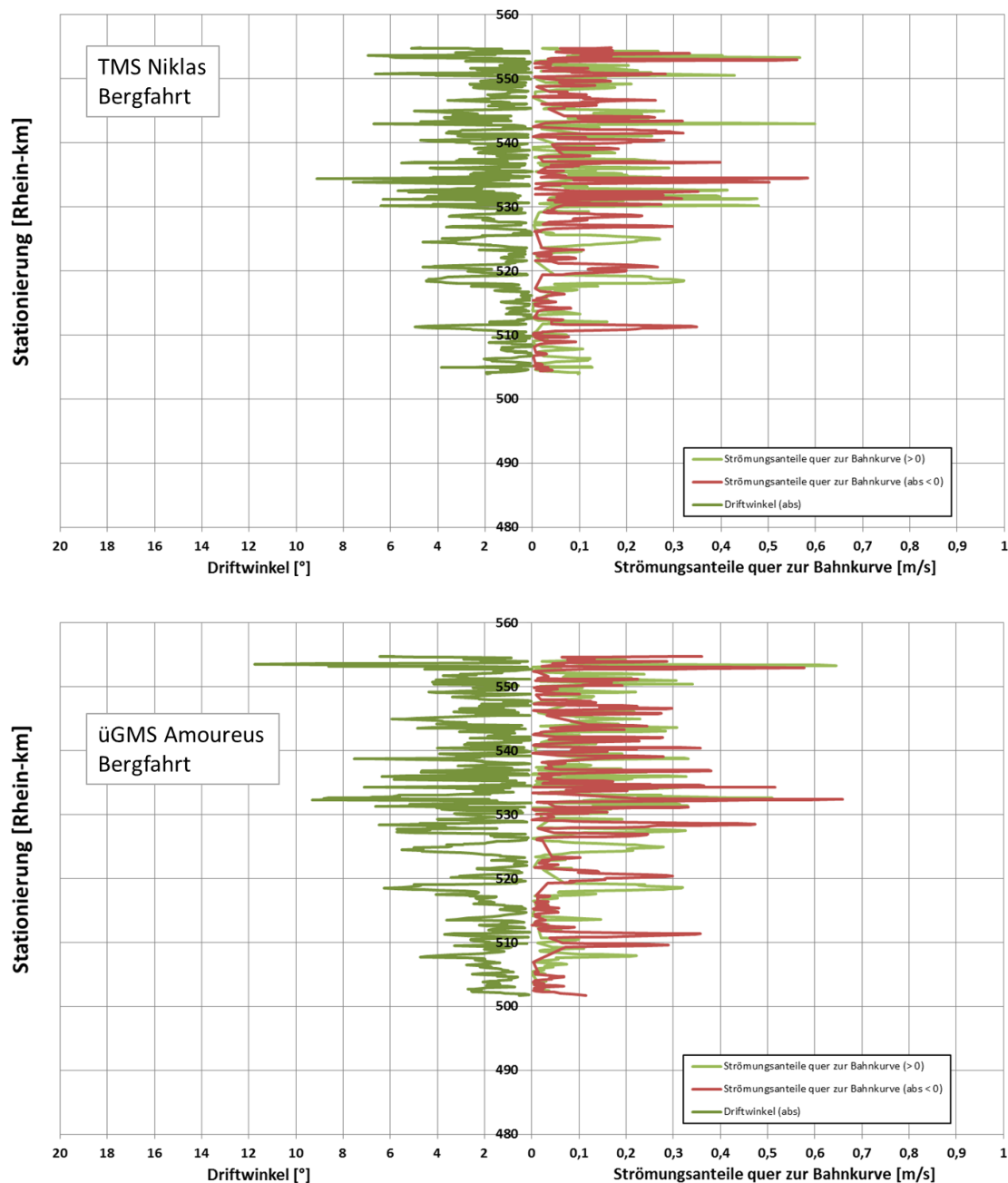


Abbildung 5-39: Kombinierte Darstellung der Auswertung der Querströmungsanteile auf die Bahnkurve und der Driftwinkelauswertung eines TMS (oben) und eines üGMS (unten) bei Hochwasser (PK460) in der Bergfahrt

### 5.2.9 Befahrbarkeitspotentiale in der Inland ENC

Binnenschifffahrtsweginformationssysteme (RIS - „River Information Services“, Kapitel 3.2) haben das Ziel, zu einem sicheren und effizienten Beförderungsablauf und damit zu einer intensiven Nutzung der Binnenwasserstraßen beizutragen (ZKR, 2013 [89]). In dem Fachgebiet der Telematik, zur verkehrstechnischen Optimierung des Systems Schiff / Wasserstraße sowie zur Verbesserung der Verkehrssicherungspflicht unter Anwendung von Informations- und Telekommunikationstechniken, gingen einige Binnenschifffahrtsweginformationssysteme und Anwendungen, wie z. B. der zentrale Nautische

Informationsfunk (NIF), das Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt (MIB), das Verkehrserfassungssystem (MOVES), die Lichtwahrschau mit Radarbeobachtung im Bereich Oberwesel am Rhein, das Internetportal der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Schifffahrt (ELWIS), das elektronische Fahrrinnen-Informationssystem (ARGO, Kapitel 3.2.2.4) und das Electronic Chart Display and Information System für den Binnenbereich (Inland ECDIS, Kapitel 3.2.1) hervor. Die Inland Electronic Navigational Charts (Inland ENC, Kapitel 3.2.2) sind ein wesentlicher Baustein des Inland ECDIS. Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits in Kapitel 3.2.2 aufgezeigt, welche Möglichkeiten es gibt, Strömungsinformationen aus Messdaten bzw. aus hydrodynamisch-numerischen Modellen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) in der Inland ENC darzustellen und welchen Nutzen diese für die Binnenschifffahrt haben können.

Sowohl die Kenntnis der Fließtiefen- als auch der Fließgeschwindigkeitsverteilung können die Schiffsführer bei der Planung und Durchführung ihrer Fahrt unterstützen. Eine kombinierte Bereitstellung der Strömungsinformationen unter Berücksichtigung relevanter Kenngrößen eines Binnenschiffes ist mittels der im Rahmen des Bewertungsverfahrens *RiNA* entwickelten Gesamtpotentiale möglich. Die Schifffahrt könnte durch Bereitstellung der Gesamtpotentiale für z. B. Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse, getrennt für die Berg- und Talfahrt, bei unterschiedlichen Tiefenansprüchen des Schiffes, unterstützt werden.

Eine Möglichkeit die Informationen auf das Schiff zu bringen, wäre die Bereitstellung eines sogenannten Onlinedienstes (z. B. eines Web Map Services, WMS) über das Internet. Die WSV stellt bereits Informationen (wie z. B. Orthophotos, Inland ENC, aktuelle Pegelstände, Einzugsgebiete) zu den Wasserstraßen über einen WMS Client dar, der bei Bedarf durch weitere Informationen ergänzt werden könnte.

Es wird ferner aufgezeigt, wie das mit dem Bewertungsverfahren *RiNA* entwickelte Befahrbarkeitspotential (Gesamtpotential) exemplarisch in der Inland ENC dargestellt und den Schiffsführern zur Unterstützung bei der Navigation bereitgestellt werden kann. Somit wäre die Überlagerung der Schiffsposition mit dem Gesamtpotential gegeben und ebenfalls die Verknüpfung mit den Schiffsdaten, wie z. B. Tiefgang, Berg- oder Talfahrt möglich. Für eine Erweiterung der Inland ENC mit den Gesamtpotentialen müsste der Inland ENC Standard angepasst und durch weitere Objekte ergänzt werden.

Exemplarisch wird im Bereich des Loreleyhafens im Mittelrhein anhand eines entwickelten Gesamtpotentials bei einem Hochwasserabfluss zu Tal die Fortentwicklung und Überlagerung eines Gesamtpotentials mit der elektronischen Navigationskarte aufgezeigt. Hierfür werden bereits bestehende Objekte (Tiefenkontur DEPCNT und Tiefenfläche DEPRE) aus der elektronischen Navigationskarte exemplarisch zweckentfremdet und anderweitig als Potentiale interpretiert. Abbildung 5-40 (links) zeigt das entwickelte Gesamtpotential bei Hochwasser zu Tal vor dem Hintergrund digitaler Orthophotos.



Aus dieser flächigen Darstellung der Befahrbarkeit, in die Strömungsinformationen, Kenngrößen eines Binnenschiffes und Informationen aus der Inland ENC eingehen, werden die Konturlinien (Grenzen zwischen den Klassenbereichen des Potentials) abgeleitet (siehe Abbildung 5-40, rechts).

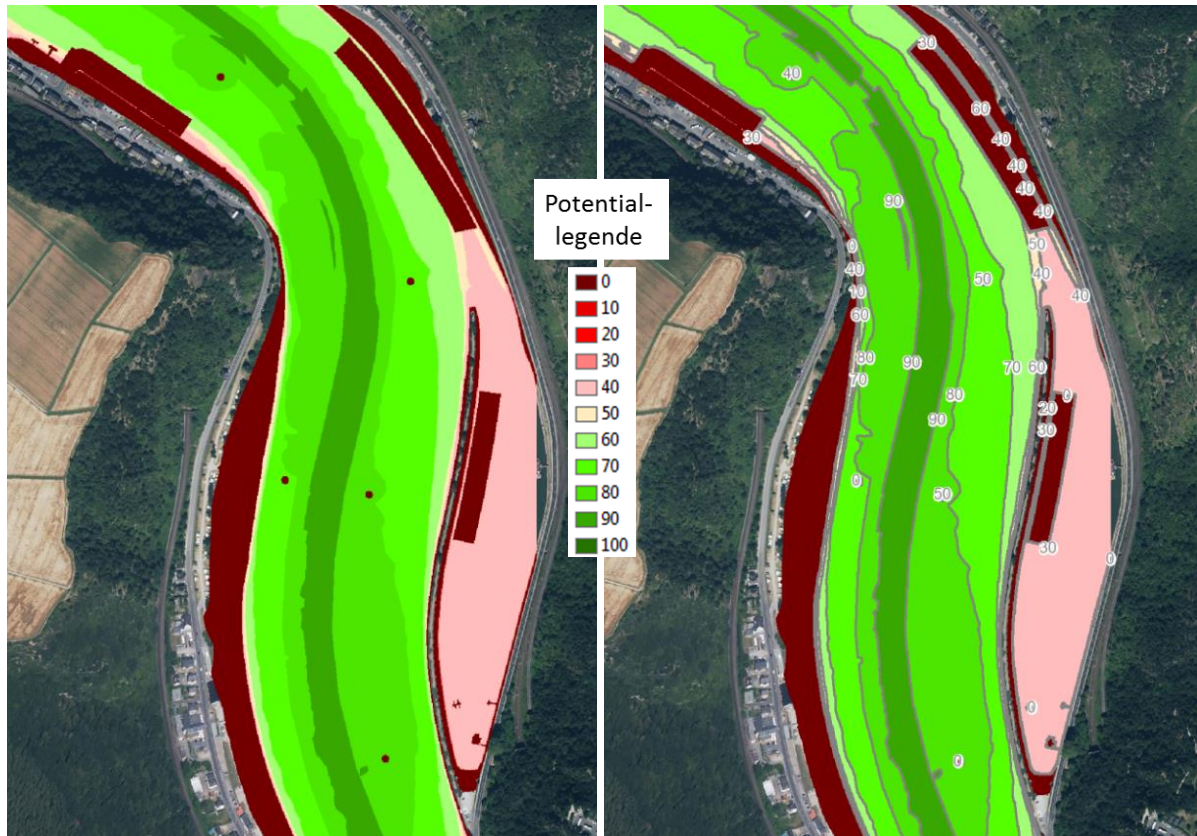


Abbildung 5-40: Ableitung der Konturlinien aus der flächigen Darstellung eines Gesamtpotentials zu Tal bei einem Hochwasserabfluss mit bekannter Potentiallegende

Aus diesen Potentialgrenzlinien werden mittels eines angepassten *FME*-Workflows zur Erstellung der Tiefenflächen und Nachbearbeitung im *ArcGIS* bzw. mit den *7Cs-Tools* (u. a. *ENC Designer*), sogenannte Potentialflächen im S-57 Datenformat generiert (siehe Abbildung 5-41).

Die unterschiedliche farbliche Abstufung der Potentialflächen erfolgt durch Festlegung spezifischer Potentialwerte ähnlich wie bei der Festlegung der Darstellungsoptionen bei den Tiefeninformationen in der Inland ENC durch den Schiffsführer (Kapitel 3.2.2.1). Der Unterschied zwischen der linken und rechten Abbildung 5-41, ist die Festlegung des oberen Potentialwertes zur farblichen Hervorhebung eines Potentials größer als 90 (links) oder größer als 80 (rechts). Der helle Bereich hat sich bis zur angegebenen Potentialwertgrenze erweitert.

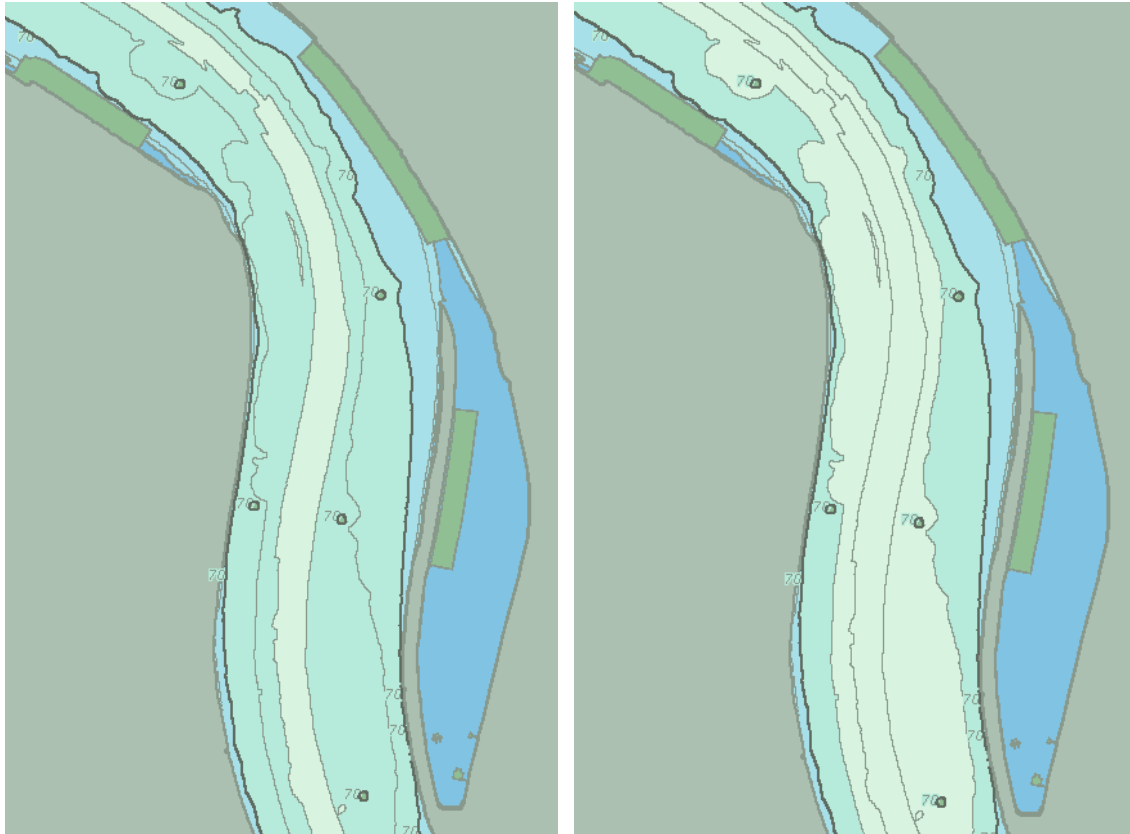


Abbildung 5-41: Darstellung eines Gesamtpotentials im Inland ENC Datenformat S-57: Zur Optimierung der Darstellung der Befahrbarkeit können Potentialwertgrenzen vom Schiffsführer festgelegt werden z. B. farbliche Abgrenzung von Potentialwerten größer als 90 (links) oder größer als 80 (rechts)

Abbildung 5-42 zeigt exemplarisch die Überlagerung des Gesamtpotentials mit der Inland ENC, wie sie z. B. dem Schiffsführer für unterschiedliche Abflussverhältnisse, Berg- und Talfahrt, Schiffsansprüche etc. zur Verfügung gestellt werden könnten. Die Abbildung zeigt die flächige Darstellung des Gesamtpotentials zur Befahrbarkeit bei einem Hochwasserabfluss zu Tal in Kombination mit der Inland ENC.

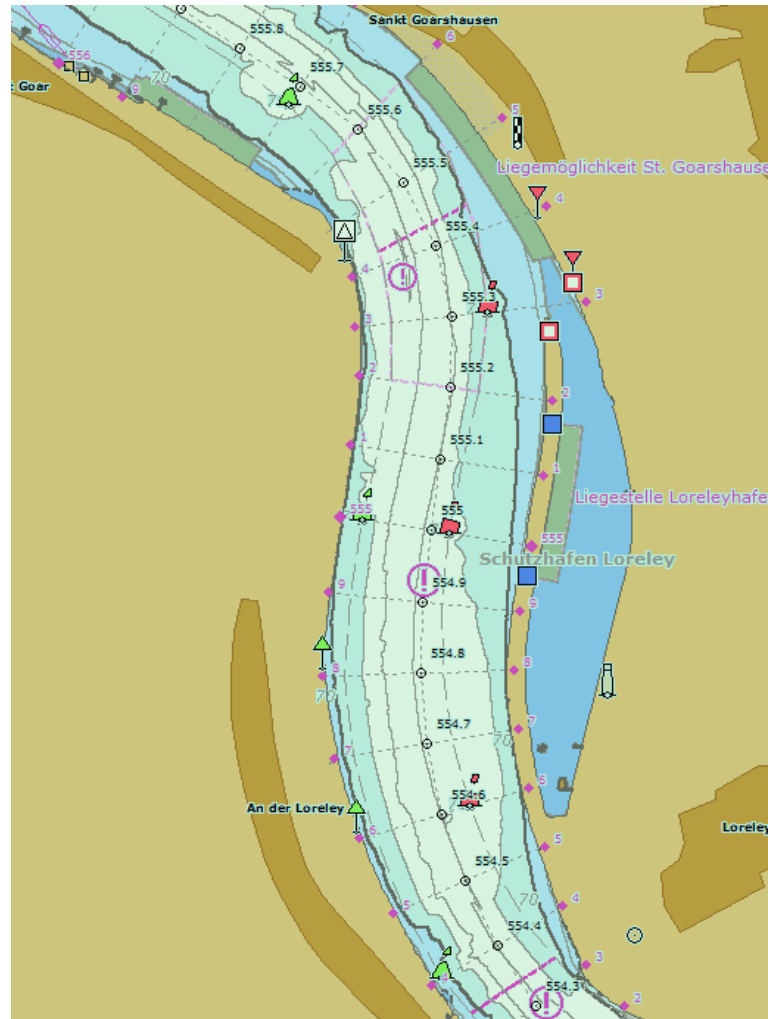
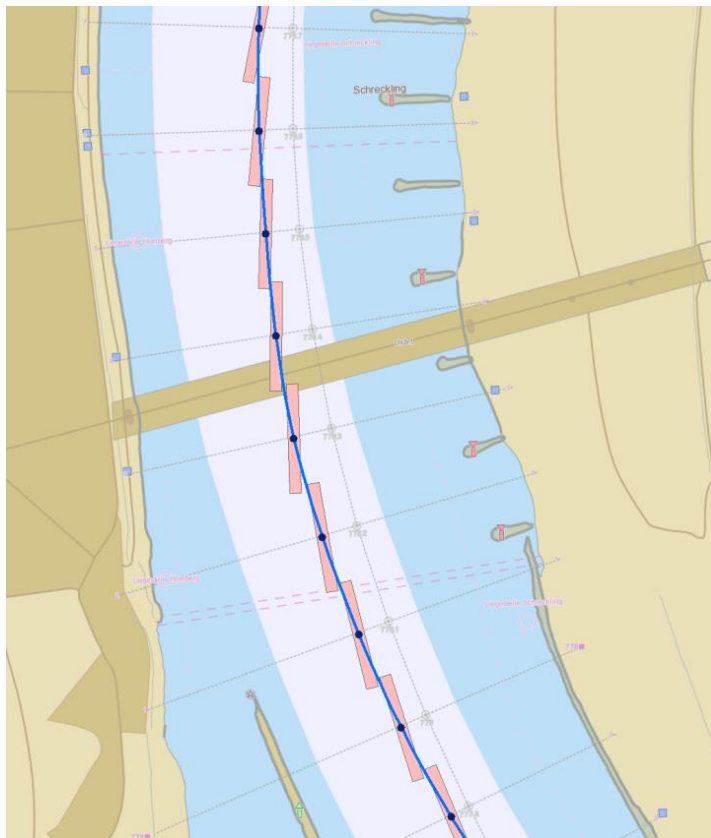
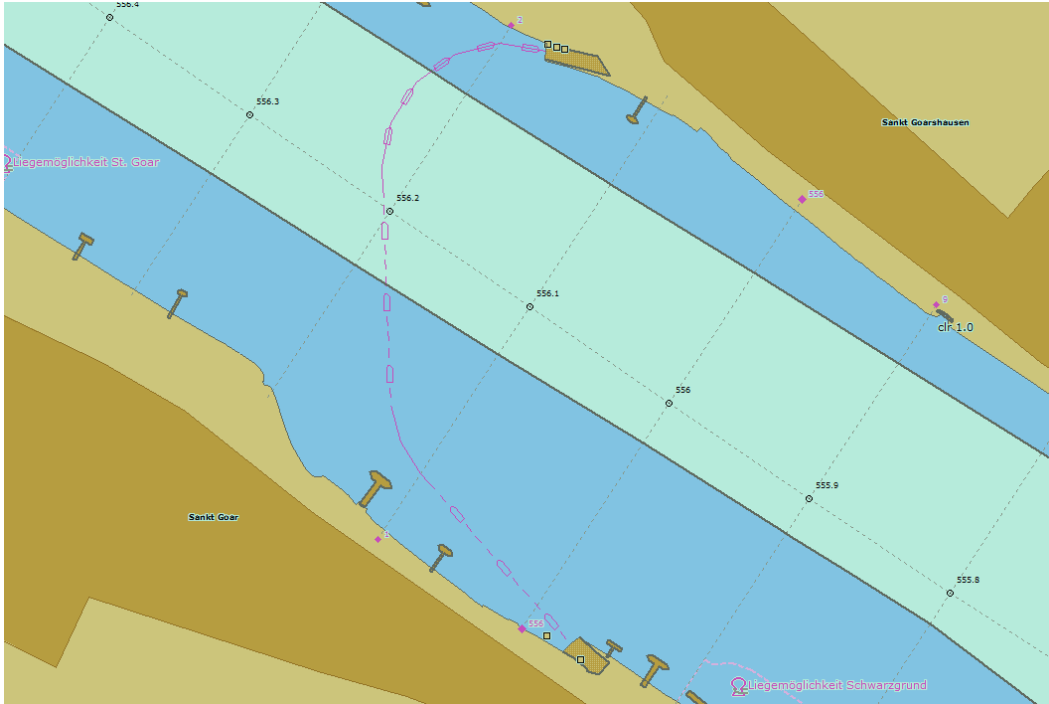


Abbildung 5-42: Gesamtpotential in der Inland ENC

Eine Weiterentwicklung wäre eine automatisierte Ableitung einer Bahnkurve aus dem Gesamtpotential für den Schiffsführer. Verknüpft mit einem Regelungssystem hätte der Schiffsführer ein geeignetes Mittel seine Fahrt zu optimieren. Navigationslinien in der Inland ENC, wie z. B. Fährlinien, Fahrinnenbegrenzungslinien, Brückendurchfahrtsregeln, Routen (zum Aufzeichnen), sind bereits im Standard vorgesehen (siehe Abbildung 5-43). Sie dienen der Erhöhung der Sicherheit des Schiffsverkehrs bzw. der Entschärfung der Unfallsituation auf Binnenwasserstraßen und könnten durch entwickelte Bahnkurven (siehe Abbildung 5-44) ergänzt werden. Zudem stellen die Befahrbarkeitspotentiale im Binnenbereich eine Grundlage für die Entwicklung von sogenannten Fahrerassistenzsystemen zur Unterstützung des Schiffsführers bei seiner Fahrt dar.



### 5.3 Fallstudien und Analysen am Niederrhein

Bei den Untersuchungen am Niederrhein stehen, neben der Potentialentwicklung für stationäre Fahrten im ungestörten Verkehr und Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten (Kapitel 5.3.1 und 5.3.2), der Aufbau der Befahrbarkeitspotentiale im fließenden Verkehr (z. B. Begegnung) bei stationärer Fahrt im Vordergrund. Dabei wurden mehrere Verfahren entwickelt, um bei einem Begegnungsverkehr das entgegenkommende Schiff bei der Gesamtpotentialerstellung mit zu berücksichtigen. Zunächst wurde ein Verfahren entwickelt, welches basierend auf einem Gesamtpotential eine Basisleitlinie (Kapitel 5.3.3) generiert. Entlang dieser Basisleitlinie werden mit weiteren Verfahren die Schiffsphasen positioniert und u. a. die Schleppfläche bzw. Fahrspurbreite abgeleitet (Kapitel 5.3.5). Die Positionierung und Ausrichtung der Schiffsphasen erfolgt in Abhängigkeit der Fahrtrichtung, des Schiffstyps, den Schiffsabmessungen und der Güte der Fahrt sowie anhand der in Kapitel 5.3.4 entwickelten Anpassungsfunktionen und Koeffizienten aus der Radius-Driftwinkelbeziehung der aufgezeichneten Schiffsfahrten. Die Schiffsphasen bzw. die Schleppfläche können wiederum bei der Gesamtpotentialentwicklung im Begegnungsverkehr in Form eines weiteren Einzelpotentials (z. B. bei Begegnungssituationen im fließenden Verkehr) in die Bewertung einbezogen werden (Kapitel 5.3.6).

#### 5.3.1 Potentialentwicklung

Für den Streckenabschnitt am Niederrhein werden für die Potentialentwicklung der berechneten Abflüsse aus dem 2D-HN-Modell der Tiefenanspruch, die Tiefenfreigabe und die Geschwindigkeitsgrenze allgemein gemäß Tabelle 5-8 festgelegt. Die Geschwindigkeitsgrenze wurde wie bei dem HN-Modell am Ober- bzw. Mittelrhein aus den allgemeinen Angaben gemäß den technischen Vorgaben der Mindestgeschwindigkeit und Stoppeigenschaften aus der Binnenschifffahrtsuntersuchungsordnung (BinSchUO; WSV, 2014 [85]) abgeleitet. Der Tiefenanspruch wird anhand der Tiefgangsangaben im Klassifizierungssystem der Binnenwasserstraßen (Anhang 1) bzw. anhand der abflussabhängig definierten Fahrrinntiefen (BMVBS, 2014 [12]) festgelegt. Werden gezielt aufgezeichnete Schiffsfahrten untersucht, müssen Parameter entsprechend den Schiffseigenschaften, Tiefgang, Squat, Flottwasser, Sicherheitszuschläge, Geschwindigkeit bestimmt werden. Der Pegel Ruhrort (Kürzel PR) bei Rhein-km 780,8 ist Bezugspegel für das Untersuchungsgebiet am Niederrhein.

Tabelle 5-8: Parameter für die Potentialentwicklung im Bereich des Niederrheinabschnittes (Bezugspegel Ruhrort: PR)

	NW	MW	HW ~ HWM I	HW ~ HWM II
Bezeichnung in der Legende	PR224	PR401	PR930	PR1149
Tiefenanspruch [cm]	270	435	450	450
Tiefenfreigabe [cm]				
Tal = Tiefenanspruch + 1 m	370	535	600	600
Berg = Tiefenanspruch + 2 m	470	635	700	700
Geschwindigkeitsgrenze [m/s]	3,6	3,6	3,6	3,6

Abbildung 5-45 stellt die Zonenauswertung der entwickelten Gesamtpotentiale (Mittelwert) zu Tal über den Streckenabschnitt in der Fahrrinne dar. Exemplarisch wurde bei der Verteilung der Wichtungsfaktoren zu Tal die Fließgeschwindigkeit mit 0,3 im Vergleich zu der Wassertiefe mit 0,7

geringer gewichtet. Bei Niedrig- (PR224) und Mittelwasser (PR401) ist ein über die Strecke gleichmäßiger Verlauf der Gesamtpotentiale erkennbar. Dies liegt an einer über die Strecke gleichmäßigen Zunahme der Fließtiefen bei steigendem Abfluss (siehe Abbildung 5-8 in Kapitel 5.1.4). Bei den beiden untersuchten Hochwasserabflüssen (PR930 und PR1149) verändert sich das Gesamtpotential nur geringfügig im Verlauf, jedoch sehr deutlich gegenüber dem Gesamtpotentialverlauf bei Niedrig- bzw. Mittelwasser. Bei Hochwasser kommt es abschnittsweise zu einer Überströmung des Vorlandes und dadurch zu einer deutlichen Veränderung der Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne (siehe Abbildung 5-9 in Kapitel 5.1.4) und somit auch des Gesamtpotentials. Bei Niedrig- bzw. Mittelwasser beträgt der Mittelwert des mittleren Gesamtpotentials über den Streckenabschnitt 67 bzw. 75. Bei den untersuchten Hochwasserabflüssen steigen die Mittelwerte etwa auf 81 bzw. 82 an.

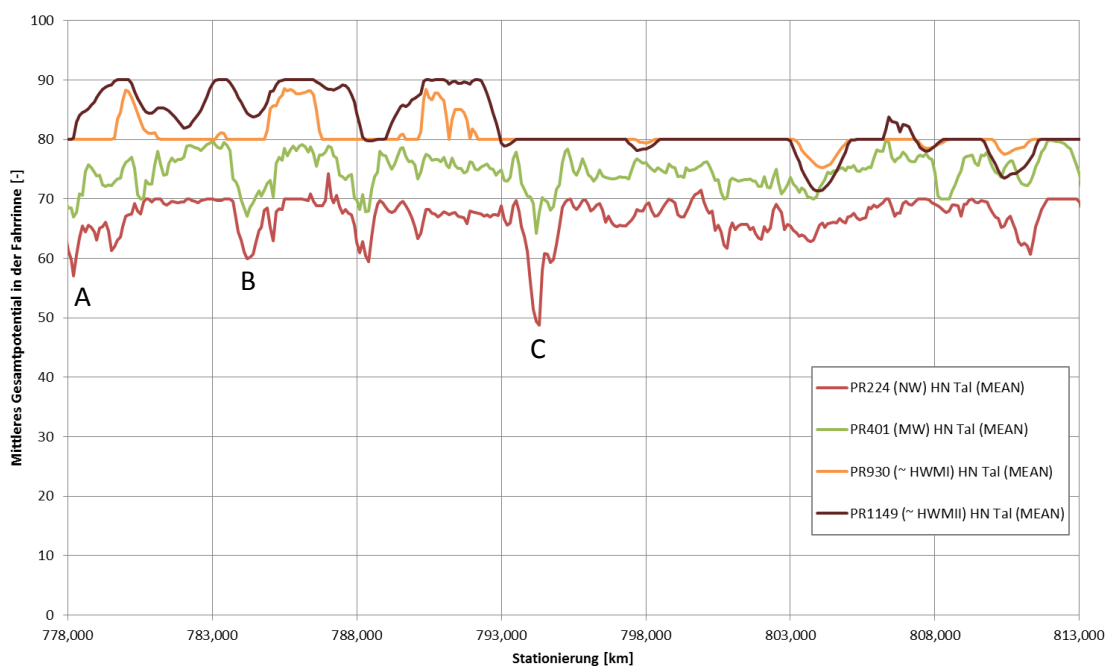


Abbildung 5-45: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen

Die Betrachtung der Mittelwerte gibt bereits Hinweise auf Einschränkungen im Fahrrinnenbereich (siehe (A), (B) und (C) in Abbildung 5-45). In Abbildung 5-46 sind exemplarisch das jeweilige Gesamtpotential zu Tal bei Niedrigwasser (PR224) für Rhein-km 778,1 (A), Rhein-km 784,2 (B) und Rhein-km 794,2 (C) dargestellt. Um reine Tiefenengpässe im Fahrrinnenbereich zu identifizieren, kann dieses Vorgehen für die Fließtiefen aus deren Einzelpotentialen durchgeführt und die Bereiche mit den Minimalwerten bzw. mit der größten Standardabweichung lokalisiert werden.

Die Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrrinne ist in Abbildung 5-47 dargestellt. Exemplarisch wurde bei der Verteilung der Wichtungsfaktoren zu Berg die Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe mit 0,5 gleich gewichtet. Bei der Niedrigwasserbetrachtung beträgt das Gesamtpotential der Bergfahrt etwa 50 (PR224) bei Rhein-km 794,0. Wie bei der Talfahrt kommt es im rechten Fahrrinnenbereich zu einer Einschränkung. Die Mittelwerte der Gesamtpotentiale in der Fahrrinne im gesamten Streckenabschnitt belaufen sich auf etwa 69 bis 71.



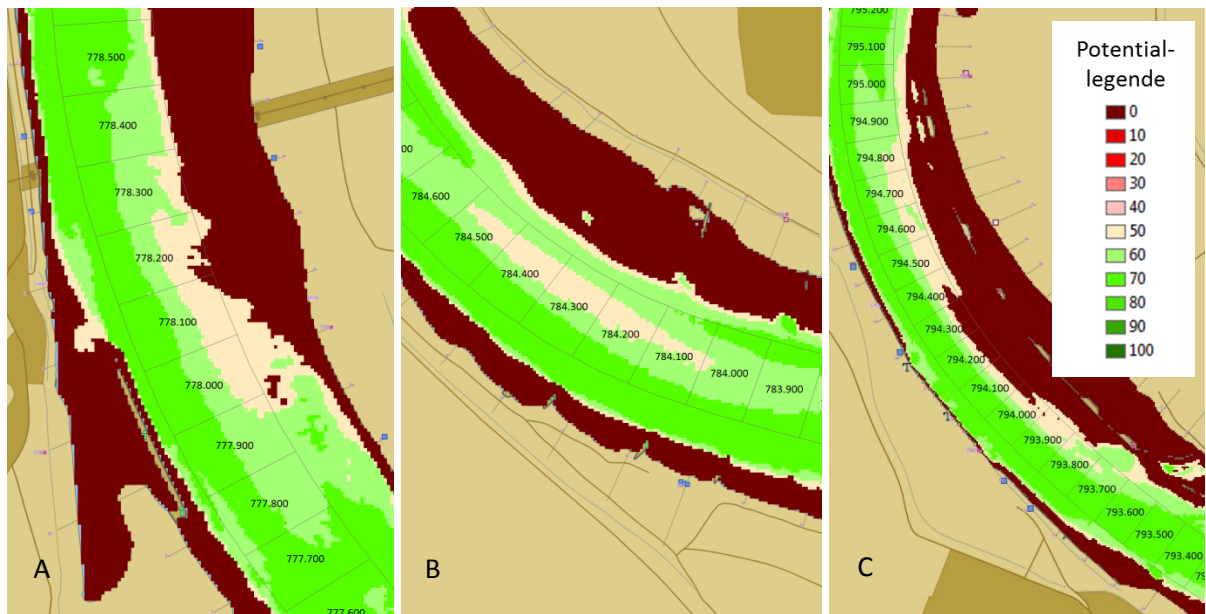


Abbildung 5-46: Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrigwasser (PR224) für Rhein-km 778,1 (A), Rhein-km 784,2 (B) und Rhein-km 794,2 (C) sowie der beschrifteten Fahrrinnenzonen

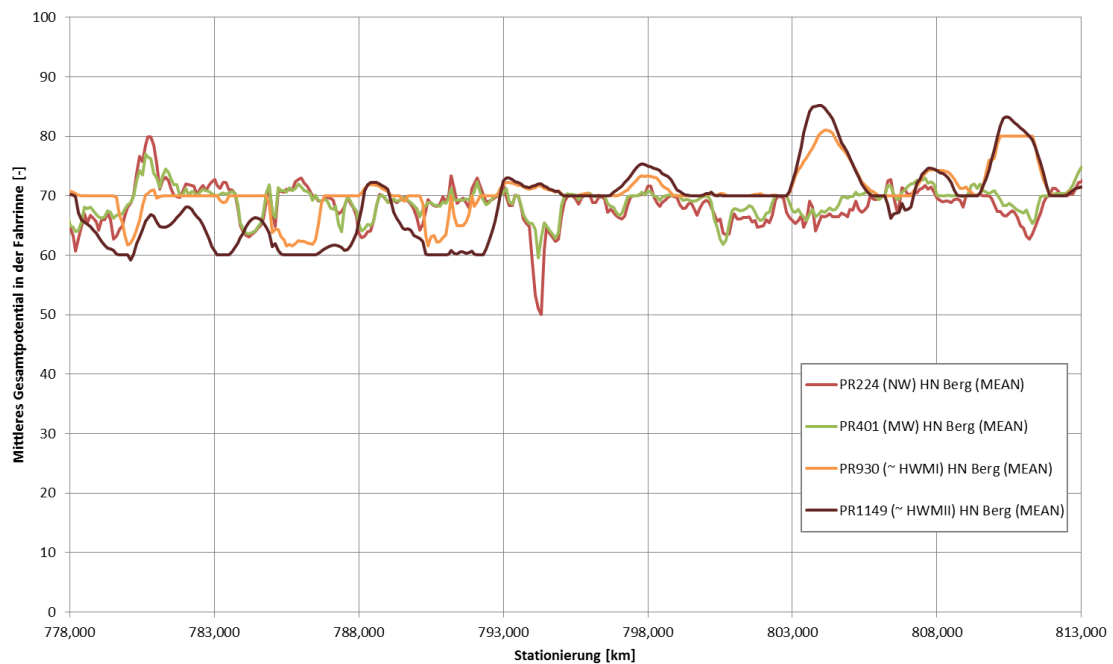


Abbildung 5-47: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen

### 5.3.2 Validierung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten

Die aufgezeichneten und aufbereiteten Schiffsfahrten (siehe Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 in Kapitel 5.1.5) können bzgl. der Lage visuell mit den Gesamtpotentialen abgeglichen oder statistische

Kenngrößen in jeder einzelnen Schiffsfläche berechnet und gegenübergestellt werden. In Abbildung 5-48 und Abbildung 5-49 sind die Vergleiche der Schiffsfahrten mit den berechneten mittleren Gesamtpotentialen in der Fahrrinne bei Niedrig- (PR224) und Mittelwasserabfluss (PR401) getrennt für die Berg- und Talfahrt dargestellt. Über die Summierung der Mittelwerte können vergleichende Aussagen über die Güte einer Fahrt basierend auf den aus den Strömungskenngrößen berechneten Gesamtpotentialen getroffen werden. Auch hier ist im Verlauf eine gute Übereinstimmung der aufgezeichneten Schiffsfahrten mit den Gesamtpotentialen erkennbar. Bei beiden untersuchten Abflüssen erreichen einzelne Schiffe zu Tal den mittleren Potentialwert aus der Fahrrinnenauswertung und die maximale mittlere Abweichung beträgt -2. Bei der Bergfahrt liegen die Schiffe mit ihrem mittleren Potentialwert um +1 bzw. +2 über dem aus der Fahrrinnenzonenauswertung.

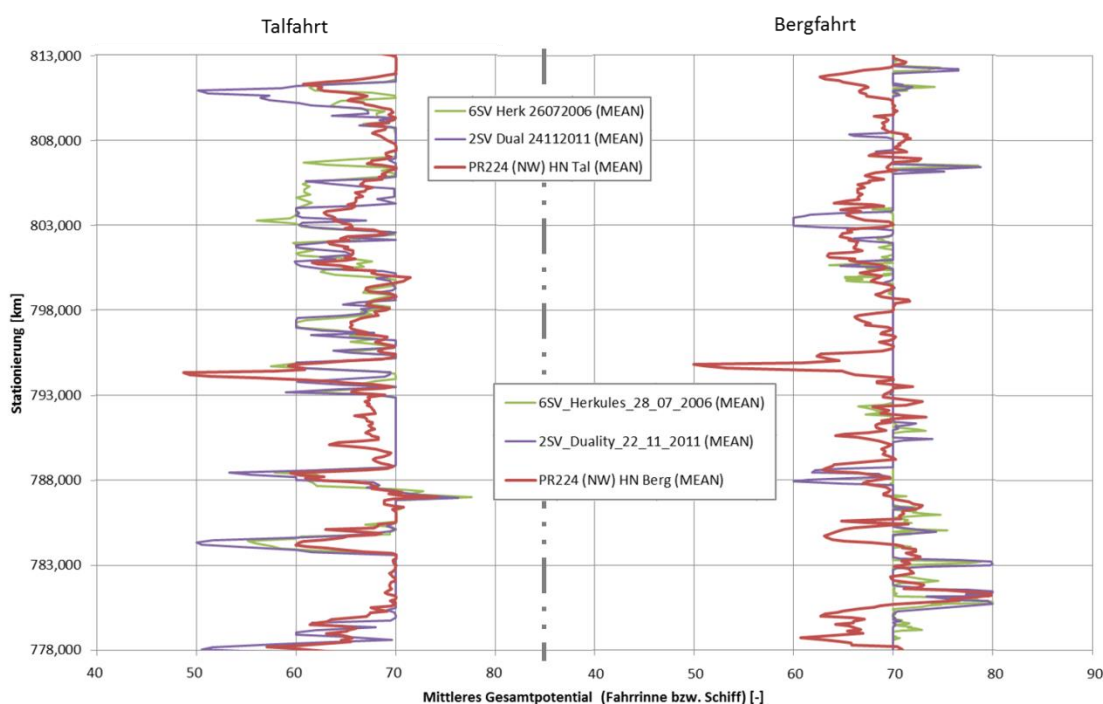


Abbildung 5-48: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials bei Niedrigwasser (PR224) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal (links) und Berg (rechts)

Einschränkungen im Fahrrinnenbereich wurden bereits bei der Potentialentwicklung der Gesamtpotentiale und Betrachtung der Fahrrinnenzonenauswertung aufgezeigt. Zudem können - wie bei den Fahrten am Mittelrhein - einzelne Abschnitte detailliert untersucht und analysiert werden, um herauszufinden, warum wie gefahren wurde und um die Gesamtpotentiale weiter zu verbessern.

Hierfür ist es jedoch empfehlenswert - wie Kapitel 5.2.6 gezeigt hat - spezifische Gesamtpotentiale zu den einzelnen Schiffsfahrten zu berechnen, welche die Abladetiefe berücksichtigen und nicht die für diesen Abfluss freigegebene Tiefe. Bei Rhein-km 794,2 (D) zu Tal (Abbildung 5-49, links) sowie bei Rhein-km 781,9 (E) und 783,0 (F) zu Berg (Abbildung 5-49, rechts) würden sonst einzelne Schiffe bei dem untersuchten Mittelwasserabfluss (PR401) über ein nicht befahrbares Potential fahren (siehe Abbildung 5-50).

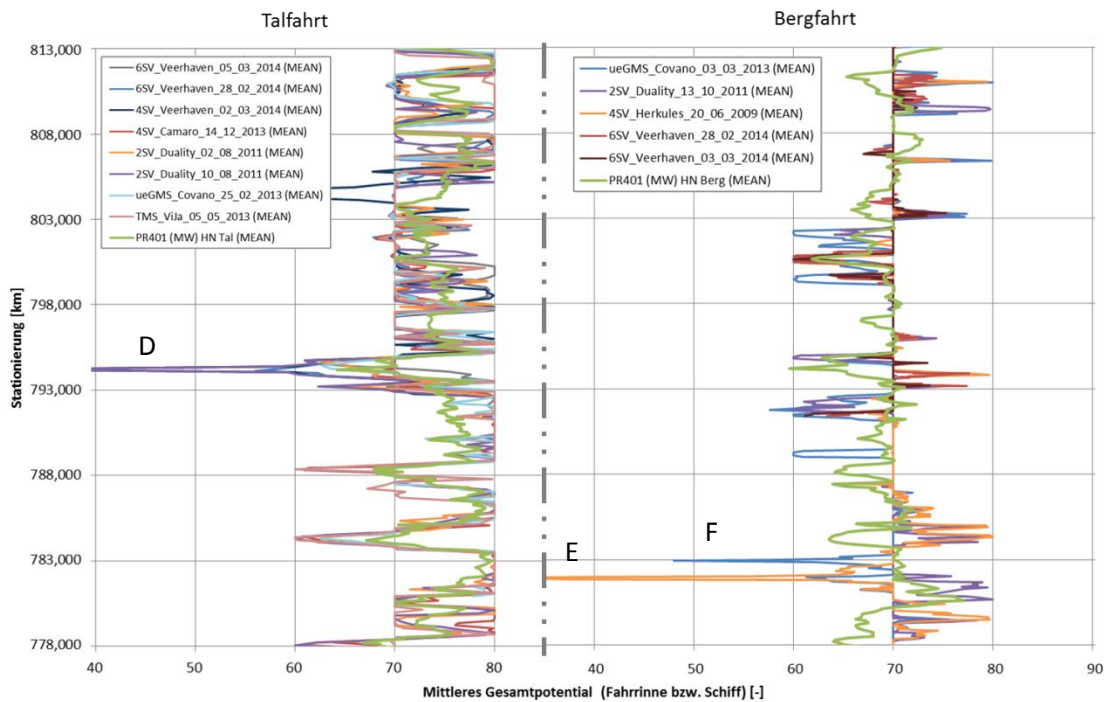


Abbildung 5-49: Auswertung des mittleren Gesamtpotentials bei Mittelwasser (PR401) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal (links) und Berg (rechts)

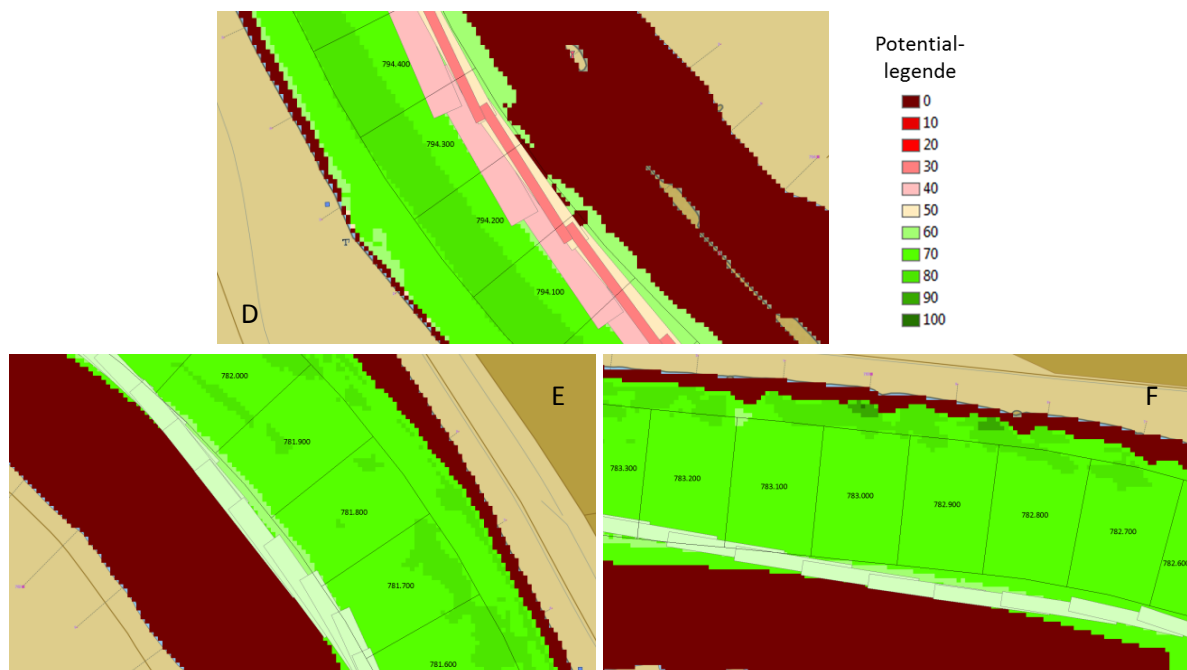


Abbildung 5-50: Überfahren eines nicht befahrbaren Gesamtpotentials zu Tal bei Rhein-km 794,2 (D) und zu Berg bei Rhein-km 781,9 (E) und 783,0 (F) bei Mittelwasser (PR401)

Bei den auffälligen Schiffen handelt es sich jedoch um Leerfahrten, Fahrten mit geringer Abladetiefe oder fehlende Angabe der Abladetiefe, sodass ein ausreichendes Potential mit großer Wahrscheinlichkeit sicher vorhanden ist, sofern man die einzelnen Fahrten und deren Tiefenanspruch bei der Potentialentwicklung berücksichtigt.

Die Validierung mit den aufgezeichneten Schiffsfahrten an den beiden Streckenabschnitten des Rheins zeigen, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen, die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen mit dem Verfahren *RiNA* visualisiert und bewertet werden kann. Das Bewertungsverfahren mit der Kombination aus Einzelpotentialen bis hin zu Gesamtpotentialen kann problemlos für weitere Streckenabschnitte des freifließenden Rheins eingesetzt werden und ist zudem in der Anwendung auch auf andere Fließgewässerabschnitte übertragbar.

### 5.3.3 Entwicklung einer Basisleitlinie basierend auf einem Gesamtpotential

Für die Entwicklung von Gesamtpotentialen im fließenden Verkehr wurden mehrere Verfahren entwickelt, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden. Zunächst wurde basierend auf einem Gesamtpotential im ungestörten Verkehr ein Verfahren innerhalb *RiNA* abgeleitet, mit dem eine Basisleitlinie entworfen wird.

Abbildung 5-51 zeigt den Ablauf bis zur Entstehung der Basisleitlinien aus einem Gesamtpotential. Hierfür werden aus den Rasterinformationen des Gesamtpotentials (oben links) die Bereiche mit einem benutzerdefinierten Potentialwert „größer als“ z. B. 70 separiert, in Vektordaten konvertiert und mit den sogenannten Achsdiskretisierungslinien verschnitten (oben rechts). Die Achsdiskretisierungslinien stehen senkrecht zur gewünschten Fahrtrichtung (hier: Fahrrinnenachse) und liegen in unterschiedlicher Diskretisierung (10 m, 30 m, 50 m oder 100 m) vor. Die Abfolge muss korrekt sein, denn diese geben die Richtung vor. Nach der Verschneidung der Achsdiskretisierungslinien mit den Vektordaten der gewünschten Potentialfläche, werden die Längenmaße bestimmt und für jede Linie ein Basisfixpunkt berechnet. Die Koordinaten der Basisfixpunkte werden in eine Attributtabelle geschrieben und die Punkte selbst zu einer Basisleitlinie verbunden (unten links). Als Schnittstelle zum Binnenschiffsführungssimulator werden die Koordinaten zusätzlich in das Koordinatensystem WGS84-LL transformiert und als Exceltabelle exportiert. Um Berg- und Talfahrt bei der Entwicklung der Basisleitlinie zu berücksichtigen und um variabel zu sein, kann mit einem Schieberegler Einfluss auf die Lage der Basisfixpunkte und somit auch auf die Lage der Basisleitlinien genommen werden (unten rechts).

Je nach gewähltem Potentialwert und Diskretisierung, aber auch bei stark veränderlicher Potentialflächenausdehnung in der Abfolge, müssen die in *RiNA* erstellten Basisleitlinien manuell überprüft und mit Optimierungsalgorithmen geglättet werden. Die Software *FME* bietet verschiedene Algorithmen mit zahlreichen Einstellungsmöglichkeiten, allerdings gibt es keinen Optimierungsalgorithmus der alle kritischen Bereiche im Untersuchungsgebiet in einem Durchlauf optimal lösen könnte. Abbildung 5-52 stellt exemplarisch eine mit der Software *FME* optimierte Basisleitlinie dar.

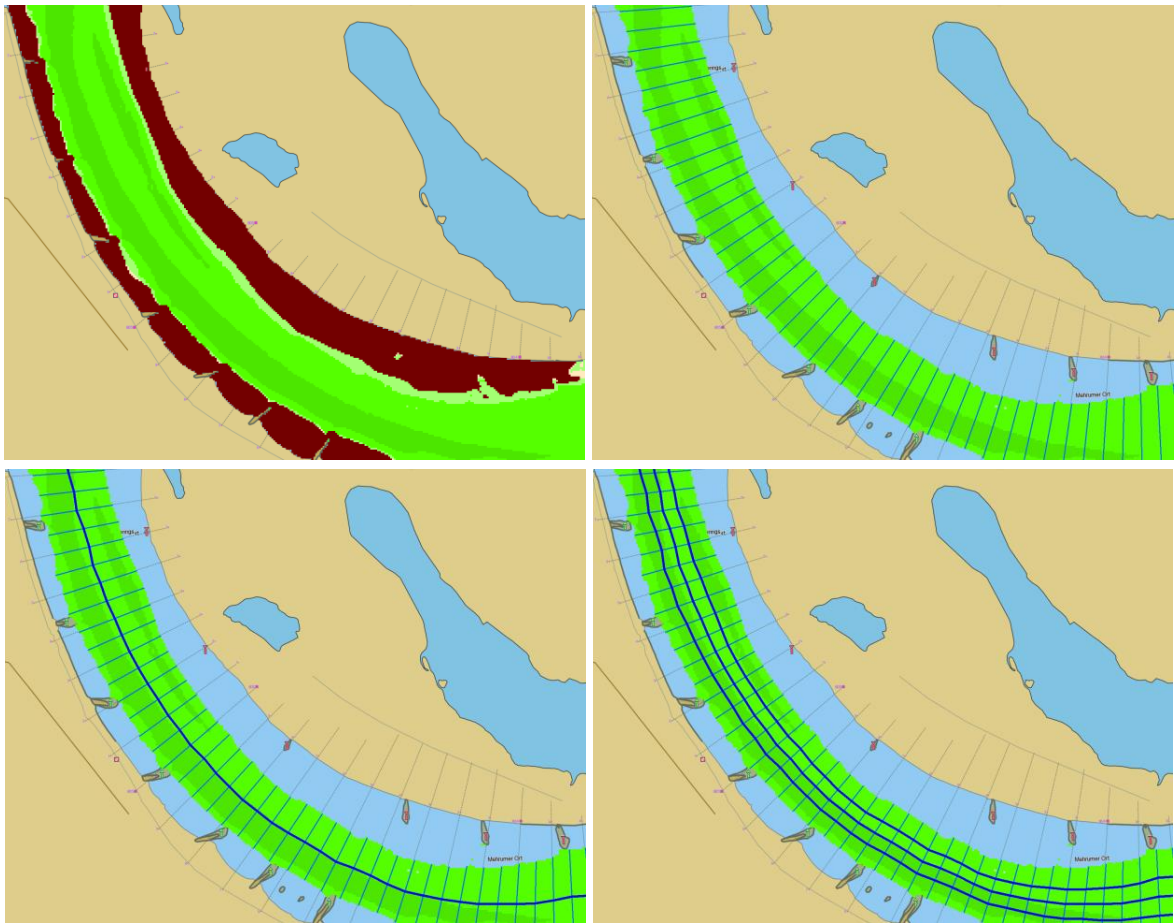


Abbildung 5-51: Exemplarische Entwicklung einer Basisleitlinie: Aus einem Gesamtpotential im ungestörten Verkehr (oben links) wird der Potentialbereich „größer als“ z. B. 70 selektiert, mit Achsdiskretisierungslinien verschnitten (oben rechts), eine Basisleitlinie (hier: Mittelachse) generiert (unten links) und ggf. variiert (unten rechts)

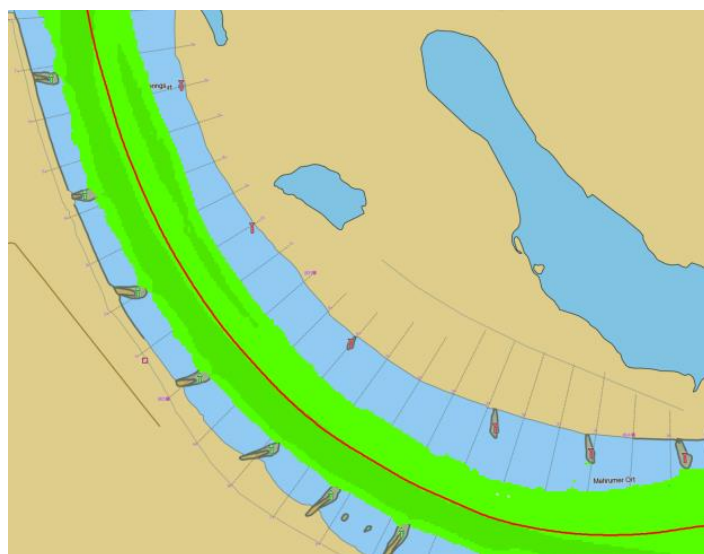


Abbildung 5-52: Optimierte Basisleitlinie (rot) mit der Software *FME* (hier: Mittelachse) bei einem Potentialbereich „größer als“ z. B. 70 (Grüntöne)



Eine Überprüfung ist also immer zwingend erforderlich, vor allem wenn z. B. nach der Wahl des Potentialwertes größer als, keine zusammenhängende Potentialfläche mehr vorhanden ist oder Sprünge in der Basisleitlinie auftreten. Solche Sprünge entstehen durch plötzliche Aufweitungen in der Potentialfläche durch Häfen, Zuflüsse, Altarme etc., können aber, durch Ausschneiden der relevanten Gesamtpotentialfläche vor der Entwicklung der Basisleitlinie, begrenzt und minimiert werden.

### 5.3.4 Entwicklung von Anpassungsfunktionen aus Schiffsfahrten

Als Vorbereitung für die Weiterentwicklung von *RiNA* für den fließenden Verkehr zur Berücksichtigung von Begegnungen (Kapitel 5.3.6) sowie für eine Abschätzung des Fahrspurbreitenbedarfs eines Schiffstypes (Kapitel 5.3.5), wurden die aufgezeichneten Schiffsfahrten (Kapitel 5.1.5) analysiert. In den beiden Untersuchungsgebieten wurden diese getrennt für die Berg- und Talfahrt nach Driftwinkeln und Radien ausgewertet.

In Abbildung 5-53 sind exemplarisch die Auswertungen mehrerer Schubverbände (hier 2SV) in der Talfahrt im Bereich des Niederrheins dargestellt. Bei den ausgewerteten Daten handelt es sich um Großausführungsmessungen. Die vorhandene Streuung in den Driftwinkeln ist u. a. auf die bei der Auswertung festgelegte Zeitdiskretisierung der aufgezeichneten Schiffsfahrten, auf unterschiedlich gefahrene Bahnkurven, auf verschiedene Abflussverhältnisse, auf ggf. unterschiedliche Schiffe gleichen Typs, ggf. unterschiedliche Schiffsführer, Motorisierung, Verkehrssituationen etc. zurückzuführen. Dennoch wurden Überlegungen angestellt, wie aus den Großausführungsmessungen unter realen Bedingungen, sogenannte Anpassungsfunktionen entwickelt werden können, um Driftwinkel, Schiffsphasen, Schleppflächen und Fahrspurbreiten abschätzen zu können.

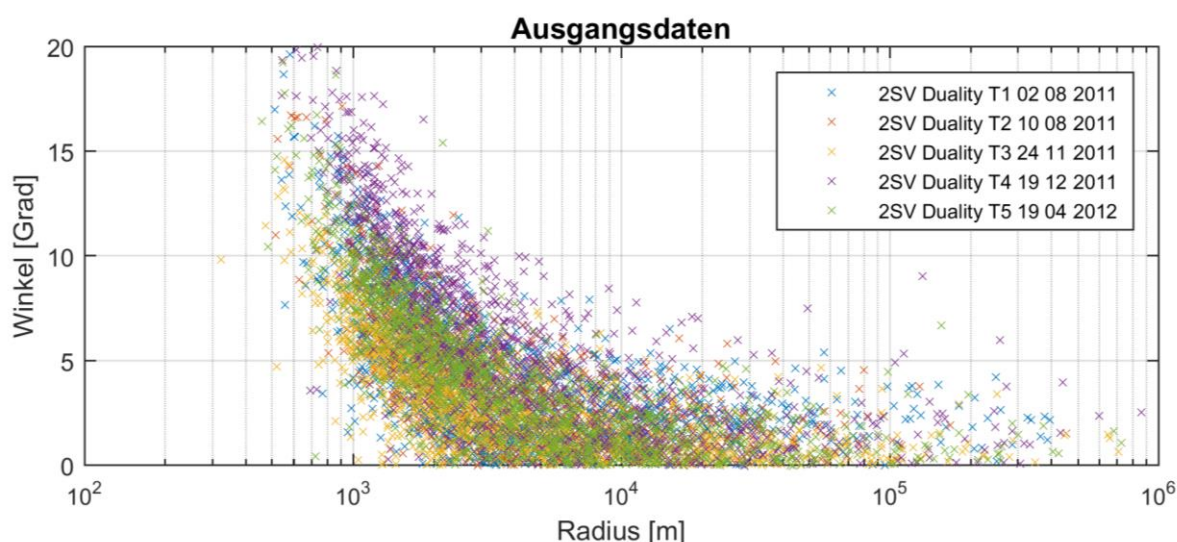


Abbildung 5-53: Exemplarische Darstellung der Driftwinkel über die Radien (log-verteilt) aus den Bahnkurven für mehrere 2SV zu Tal im Untersuchungsgebiet des Niederrheins

Hierfür wurden die Radien einer Klasseneinteilung unterzogen (siehe farbliche Abstufung in Abbildung 5-54). Bei kleineren Radien hat sich eine feinere Abstufung der Klassen und bei größeren



Radien eine entsprechend größere Abstufung bewährt. Basierend auf den einzelnen Klassen wurden statistische Kenngrößen (u. a. Minimum, Mittelwert, Standardabweichung) aus den Driftwinkeln ermittelt. Abbildung 5-54 stellt exemplarisch für die 2SV zu Tal das Minimum, den Mittelwert und das Maximum in den einzelnen Klassen dar. Als Maß für das Maximum wurde die Summe aus Mittelwert und zweifacher Standardabweichung berechnet, um mögliche Ausreißer nicht zu stark zu gewichten, die bei Manöversituationen (z. B. Wartemanöver zu Berg) trotz angepasster Zeitdiskretisierung aus den Messdaten nicht 100 %ig automatisch zu deselektieren sind. Eine zusätzliche Sicherheit bietet die Angabe einer Mindestanzahl an Werten innerhalb einer Klasse. Bei Unterschreitung der Mindestanzahl entfällt diese Klasse bei der Entwicklung der Anpassungsfunktionen.

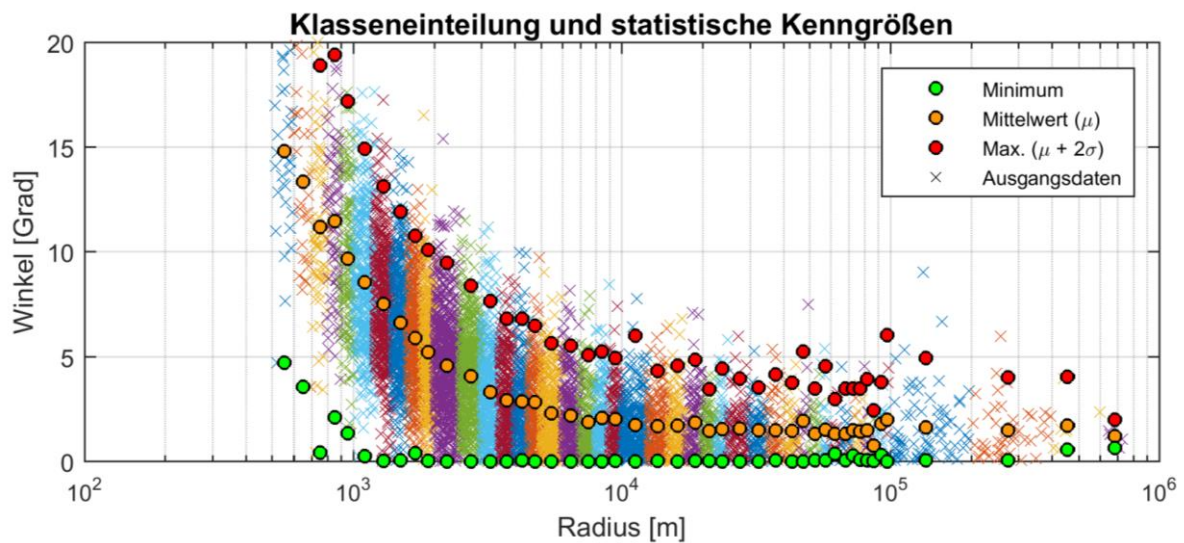


Abbildung 5-54: Klasseneinteilung der Radien (hier: 2SV zu Tal) und Ermittlung der statistischen Kenngrößen aus den Driftwinkeln innerhalb der Klasseneinteilung (log-verteilt)

Aus den statistischen Kenngrößen der einzelnen Klassen wurden Anpassungsfunktionen für eine „gute, moderate und schwache Fahrt“ entwickelt. Hierfür wurde die Potenzfunktion in der Form  $f(x) = a \cdot x^n + c$  ausgewählt und der Koeffizient  $a$ , der Grad  $n$  und die Konstante  $c$  bestimmt. Abbildung 5-55 stellt exemplarisch die Anpassungsfunktionen für die 2SV zu Tal dar.

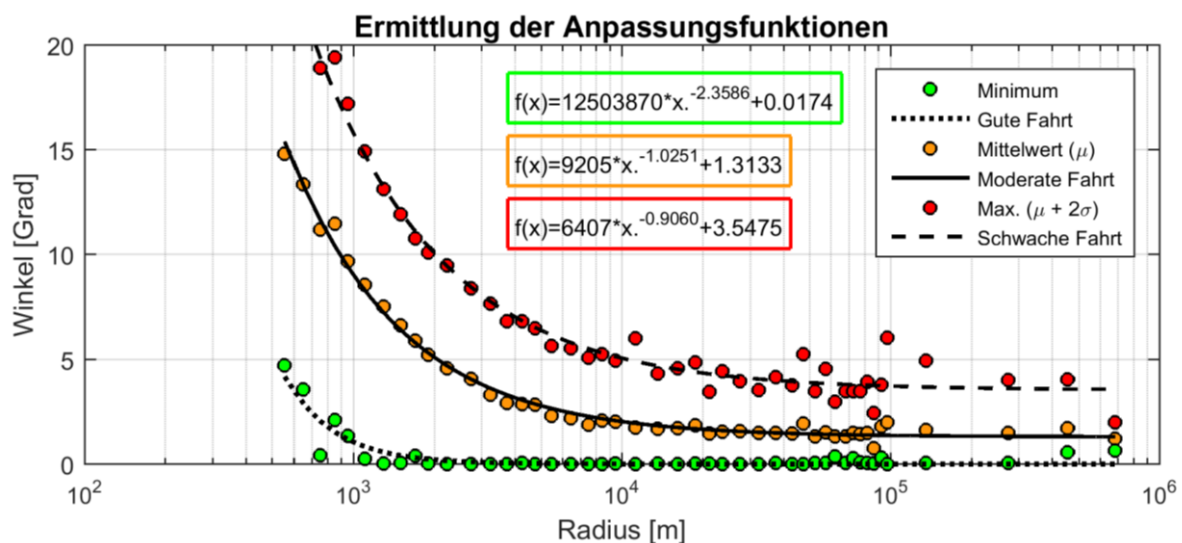


Abbildung 5-55: Exemplarische Darstellung der Anpassungsfunktionen der 2SV zu Tal aus statistischen Kenngrößen der Driftwinkel für eine „gute, moderate und schwache Fahrt“ (log-verteilt)

In Tabelle 5-9 sind die Parameter für die unterschiedlichen Schiffstypen, Fahrtrichtung und Güte der Fahrt („gut, moderat und schwach“) im Untersuchungsgebiet des Niederrheins dargestellt. Die Auswertung des üGMS zu Berg wurde ausgegraut, da nur eine Bergfahrt dieses Schiffstyps vorlag. Besonders bei der Bergfahrt wird empfohlen, die Schrittweite bei der Auswertung der Großausführungsmessungen um eine räumliche Diskretisierung zu erweitern.

Im Anhang 5 sind die Diagramme zu den Ausgangsdaten, der Klasseneinteilung sowie der Anpassungsfunktionen für die untersuchten Schiffstypen (TMS, üGMS, 2SV, 4SV und 6SV) getrennt für Berg und Tal im Untersuchungsgebiet des Niederrheins dargestellt.

Ergänzend wurde die Entwicklung von Anpassungsfunktionen anhand der Auswertungen für die aufgezeichneten Schiffsfahrten im Untersuchungsgebiet des Ober- bzw. Mittelrheins durchgeführt. Im Anhang 6 sind - analog wie für den Niederrhein - die zusammenfassende Tabelle und die Diagramme zu den Ausgangsdaten, der Klasseneinteilung sowie der Anpassungsfunktionen für die untersuchten Schiffstypen getrennt für Berg und Tal dargestellt.

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen besteht Bedarf, die entwickelten Anpassungsfunktionen aus den Großausführungsmessungen je nach Schiffstyp und Fahrtrichtung hinsichtlich Abfluss, hydraulisch vergleichbaren Gewässerabschnitten und Vergleich unterschiedlicher Fließgewässerabschnitte weiter zu untersuchen, um eine Übertragbarkeit der Fahrspurbreitenabschätzung auf andere Gewässerabschnitte abzuleiten.

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der Anpassungsfunktionen für verschiedene Schiffstypen, Fahrtrichtung und Güte der Fahrt im Untersuchungsgebiet des Niederrheins

Schiffstyp	Fahrtrichtung (NR)	Funktion $f(x) = a \cdot x^n + c$			Fahrt
		a	n	c	
TMS	Tal	5,6801E+03	-0,9617	3,0806	Schwache Fahrt
ueGMS	Tal	1,9563E+03	-0,7025	1,3473	Schwache Fahrt
2SV	Tal	6,4066E+03	-0,9060	3,5475	Schwache Fahrt
4SV	Tal	2,2450E+04	-1,1082	6,7964	Schwache Fahrt
6SV	Tal	8,0805E+02	-0,6054	4,3287	Schwache Fahrt
TMS	Berg	3,4555E+02	-0,7484	4,2751	Schwache Fahrt
ueGMS	Berg	4,0052E+04	-1,4472	2,8969	Schwache Fahrt
2SV	Berg	2,6748E+01	-0,2944	2,3083	Schwache Fahrt
4SV	Berg	1,1267E+03	-0,9406	5,9498	Schwache Fahrt
6SV	Berg	2,2557E+04	-1,5935	5,9934	Schwache Fahrt
TMS	Tal	1,2579E+04	-1,1499	1,2903	Moderate Fahrt
ueGMS	Tal	4,3730E+03	-0,9140	0,6278	Moderate Fahrt
2SV	Tal	9,2054E+03	-1,0251	1,3133	Moderate Fahrt
4SV	Tal	5,3136E+05	-1,6686	3,2811	Moderate Fahrt
6SV	Tal	4,0188E+03	-0,8822	1,8606	Moderate Fahrt
TMS	Berg	4,5096E+04	-1,6380	1,7769	Moderate Fahrt
ueGMS	Berg	1,8306E+05	-1,8071	1,1561	Moderate Fahrt
2SV	Berg	1,0257E+03	-1,0268	1,3144	Moderate Fahrt
4SV	Berg	3,7327E+03	-1,2786	2,4866	Moderate Fahrt
6SV	Berg	3,2198E+03	-1,3690	2,3436	Moderate Fahrt
TMS	Tal	1,1078E+08	-2,7201	0,0536	Gute Fahrt
ueGMS	Tal	1,5820E+06	-1,9634	0,0322	Gute Fahrt
2SV	Tal	1,2504E+07	-2,3586	0,0174	Gute Fahrt
4SV	Tal	9,8964E+08	-2,9567	0,2828	Gute Fahrt
6SV	Tal	2,9810E+07	-2,2432	0,0558	Gute Fahrt
TMS	Berg	6,2584E+08	-3,6424	0,1079	Gute Fahrt
ueGMS	Berg	2,1409E+09	-3,5116	0,0450	Gute Fahrt
2SV	Berg	5,1184E+03	-7,5184	0,0352	Gute Fahrt
4SV	Berg	-2,3764E+01	-0,7589	0,2035	Gute Fahrt
6SV	Berg	1,9467E+03	-7,4011	0,1518	Gute Fahrt

Die Fahrspurbreite  $b$  eines Schiffes kann in Abhängigkeit des Driftwinkels vereinfacht wie folgt trigonometrisch abgeschätzt werden durch:

$$b = B \cdot \cos\beta + L \cdot \sin\beta \quad [5-1]$$

und für Driftwinkel mit  $\cos\beta \cong 1$  reduziert werden zu:

$$b = B + L \cdot \sin\beta \quad [5-2]$$

$b$  Fahrspurbreite [m]

$B$  Schiffsbreite [m]

$L$  Schiffslänge [m]

$\beta$  Driftwinkel [°]

Die Abschätzung der Fahrspurbreite  $b$  eines Schiffes berücksichtigt keine Überlagerung aufeinanderfolgender Schiffsphasen und sollte bei kleinen Radien  $R < 500 \text{ m}$  und Driftwinkeln  $\beta < 5^\circ$  nicht

angewendet werden. Dennoch ist eine Genauigkeit im Meterbereich bei der Anwendung für große Radien (Geradeausfahrt) und kleineren Driftwinkeln zu erwarten.

Die Fahrspurbreite bei der Geradeausfahrt setzt sich in der Praxis zusammen aus der Schiffsbreite und einer Zusatzbreite  $\Delta B_F$  (siehe Gleichung [2-5] in Kapitel 2.1.2.1). Bei der Auswertung der Schiffsfahrten (z. B. Tabelle 5-9 im Untersuchungsgebiet des Niederrheinabschnittes) repräsentiert die Konstante  $c$  dabei den sich einstellenden Driftwinkel eines Schiffstyps in Abhängigkeit der Fahrtrichtung bei großen Radien (Geradeausfahrt) und Güte der Fahrt. So kann die Zusatzbreite  $\Delta B_F$  bei der Geradeausfahrt vereinfacht abgeschätzt werden durch:

$$\Delta B_F = L \cdot \sin\beta = L \cdot \text{sinc} \quad [5-3]$$

$\Delta B_F$      Zusatzbreite [m]

$c$          Driftwinkel bzw. Konstante aus Anpassungsfunktion bei Geradeausfahrt [°]

Die Ermittlung der Fahrspurbreiten unter Berücksichtigung der Überlagerung einzelner Schiffsphasen wird im folgenden Kapitel aufgezeigt.

### 5.3.5 Ableitung der Schiffsphasen, Schleppflächen und Fahrspurbreiten

Mittels eines entwickelten Workflows innerhalb der Software *FME* werden anhand einer Leitlinie bzw. Bahnkurve, die Schiffsphasen, Schleppflächen und Fahrspurbreiten automatisiert berechnet. Als Leitlinien bzw. Bahnkurven werden die aus den Gesamtpotentialen abgeleiteten Basisleitlinien (Kapitel 5.3.3) oder die Bahnkurven aus den aufgezeichneten Schiffsfahrten verwendet, indem die Flächenschwerpunkte der einzelnen Schiffsphasen nacheinander zu einer Bahnkurve verbunden werden. Abgefragte Eingabeparameter bzw. Wahlmöglichkeiten (siehe Abbildung 5-56) sind neben dem Speicherort der Ergebnisse, der Streckenabschnitt, der Schiffstyp, die Schiffslänge und Schiffsbreite, die Fahrtrichtung sowie die entsprechenden Koeffizienten der Anpassungsfunktionen je nach Güte der Fahrt („gut, moderat und schwach“). Hinterlegte Eingabeparameter sind Achsdiskretisierungslinien für die Schiffspositionierung entlang der Bahnkurve und für die Berechnung der Fahrspurbreiten aus den Schleppflächen sowie für das Mitführen eines Kilometerbezuges für die diagrammbezogene Darstellung. Die Schleppfläche ist abhängig von der Diskretisierung der Achslinien. Aus den Eckpunkten des Schiffes (Bug und Heck) werden vier Berandungslinien ermittelt und eine vorläufige Schleppfläche abgeleitet. Die endgültige Schleppfläche entsteht aus einer Überlagerung dieser vorläufigen Schleppfläche und der positionierten Schiffsphasen.

Abbildung 5-56: Erforderliche Eingabeparameter für die Entwicklung der Schiffsphasen, Schleppfläche und Fahrspurbreiten innerhalb der Software *FME*

In Abbildung 5-57 ist exemplarisch für ein TMS zu Tal, mit einer Länge von 108,37 m und einer Breite von 11,45 m, die Entwicklung der Schiffsphasen, der Schleppfläche und der Fahrspurbreiten aus einer Leitlinie bzw. Bahnkurve dargestellt. Zudem bietet die Software *FME* Generalisierungs- und Glättungsalgorithmen, um z. B. die aus den Gesamtpotentialen abgeleitete Basisleitlinie zu überarbeiten. Es ist empfehlenswert große Abweichungen in einer Leitlinie (z. B. durch plötzliche Querschnittsaufweitungen bei Häfen, Zuflüssen oder im Brückenbereich) vorab manuell zu korrigieren. Mit den Koeffizienten aus den Anpassungsfunktionen können je nach gewählter Güte der Fahrt („gut, moderat oder schwach“) für ein Bemessungsschiff in Abhängigkeit des Schiffstyps, der Fahrtrichtung und der Schiffsabmessungen, die Fahrspurbreiten berechnet und visualisiert werden.

Abbildung 5-58 stellt exemplarisch in der Fläche und Abbildung 5-59 kilometerbezogen in Diagrammform, die Entwicklung des unterschiedlichen Fahrspurbreitenbedarfs eines TMS zu Tal für einen Niederrheinabschnitt dar. Die Fahrspurbreiten werden aus der überlagerten Schleppfläche berechnet. Die theoretischen Verfahren zur Fahrspurbreitenermittlung (Kapitel 2.1.2) berücksichtigen diese Überlagerung nicht.

Durch Addition des Fahrspurbreitenbedarfs von Berg- und Talfahrt und Zuschlag von Sicherheitsabständen zwischen Schiff / Schiff bzw. Schiff / Ufer kann die Fahrrinnenbreite für verschiedene Schiffstypen basierend auf der gewählten Leitlinie bzw. Bahnkurve abgeschätzt werden. Die jeweiligen Schleppflächen müssen auf Überschneidung und ausreichenden Sicherheitsabstand Schiff / Schiff bzw. Schiff / Ufer überprüft und die Leitlinie bzw. Leitlinien in diesen Bereichen - ggf. sofern möglich - angepasst werden. Eine Kopplung mit einem Regelungssystem zur Überprüfung, ob die Leitlinien real gefahren werden können, sollte angestrebt werden.

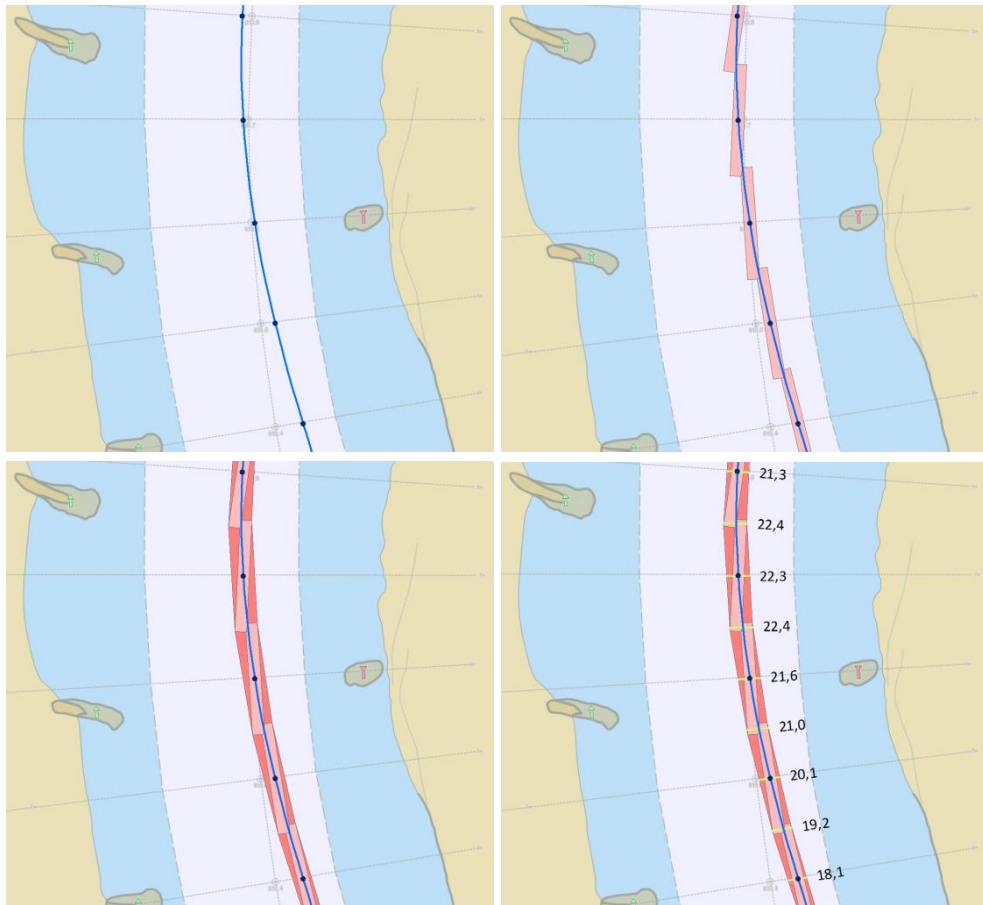


Abbildung 5-57: Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Schiffsphasen, Schleppfläche und der Fahrspurbreiten aus der Leitlinie bzw. Bahnkurve eines TMS zu Tal und Visualisierung in ArcGIS

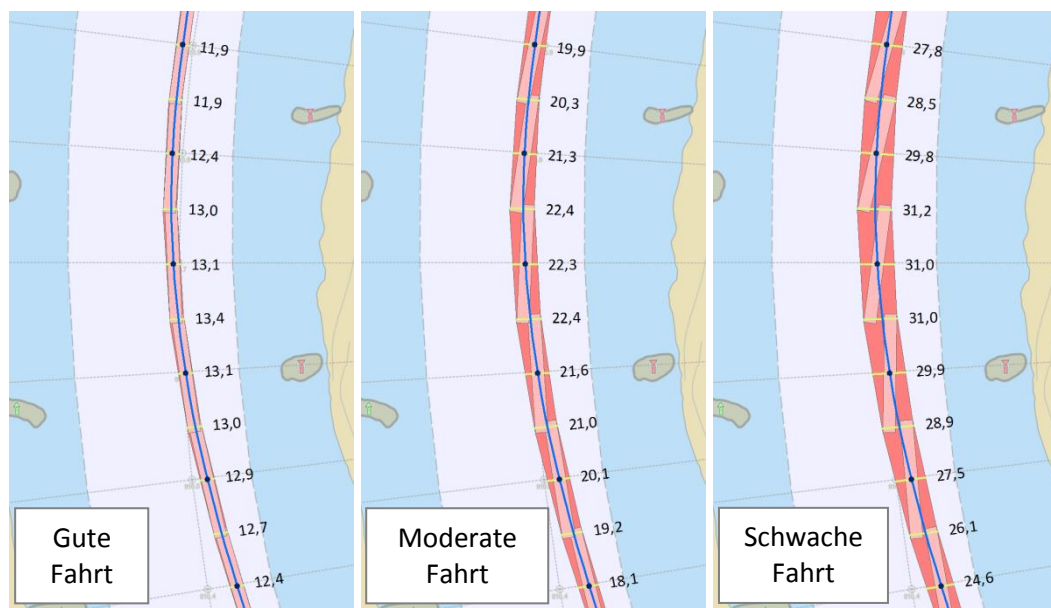


Abbildung 5-58: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des unterschiedlichen Fahrspurbreitenbedarfs eines TMS zu Tal durch Variation der Koeffizienten anhand der Güte einer Fahrt (gut, moderat und schwach)



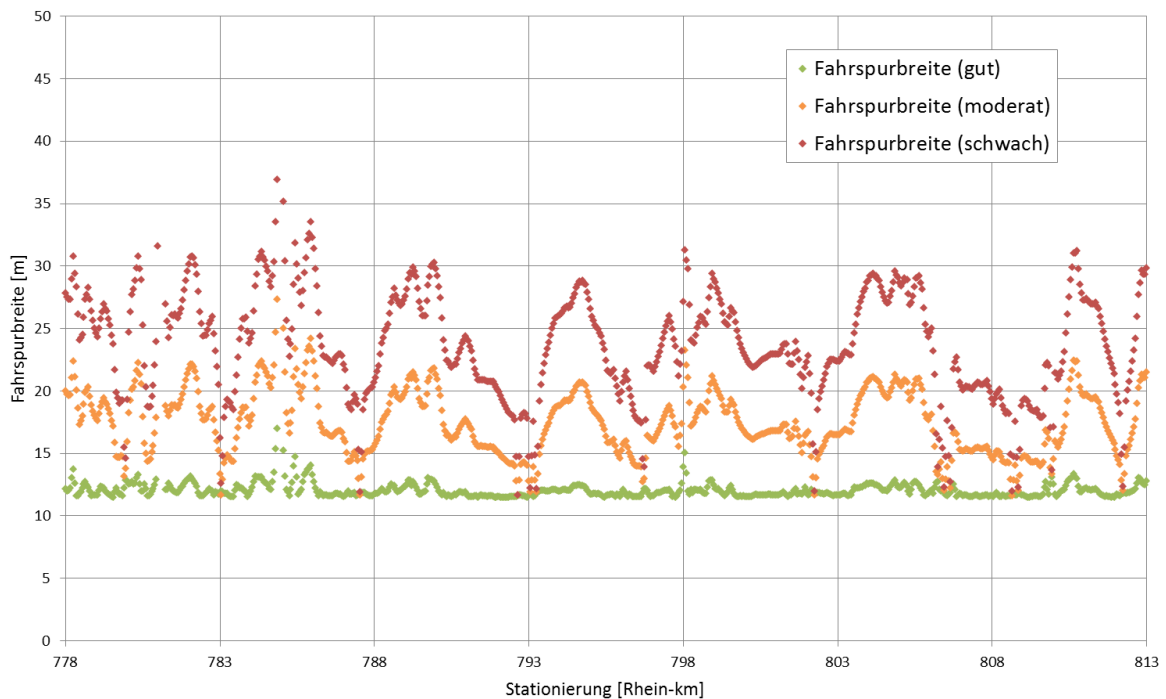


Abbildung 5-59: Diagramm der Fahrspurbreiten aus der überlagerten Schleppfläche eines TMS zu Tal bei variierender Güte der Fahrt

### 5.3.6 Potentialentwicklung im fließenden Verkehr

Für ein Gesamtpotential im Begegnungsverkehr müssen, neben den Einzelpotentialen aus den hydrodynamisch-numerischen Modellen und ggf. den Einzelpotentialen aus der Inland ENC, zusätzliche Einzelpotentiale für z. B. Begegnungssituationen berücksichtigt werden. Exemplarisch wird die Gesamtpotentialentwicklung einer Begegnungssituation zweier sechser Schubverbände (6SV) bei einem Mittelwasserabfluss (PR401) an einem Niederrheinabschnitt aufgezeigt.

Zunächst wird aus den aufgezeichneten Schiffsfahrten bei Mittelwasser eine Bahnkurve eines 6SV zu Tal ausgewählt oder gemäß Kapitel 5.3.3 eine Basisleitlinie aus dem entsprechenden Gesamtpotential zu Tal entwickelt. Ausgehend von der Bahnkurve bzw. Leitlinie können die Schiffsphasen und Schleppflächen mit dem entwickelten Verfahren abgeleitet werden (Kapitel 5.3.5).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten ein Einzelpotential für die Talfahrt eines 6SV, dreireihig und zweigliedrig (3R2G), mit einer Länge von 193,0 m und einer Breite von 34,2 m zu generieren (siehe Abbildung 5-60, links, mitte und rechts). Der einfachste Fall geht von der Bahnkurve aus (links) und berücksichtigt die Fahrspurbreite in Form eines Sicherheitsabstandes. Um diesen abzuschätzen ist die Kenntnis der kleinsten Krümmungsradien innerhalb des Streckenabschnittes erforderlich (siehe Abbildung 5-5 in Kapitel 5.1.3). Anhand der entwickelten Anpassungsfunktionen (Kapitel 5.3.4 bzw. Anhang 5) kann der Driftwinkel, z. B. für eine moderate Fahrt, und zusammen mit den Schiffsabmessungen, die Fahrspurbreite trigonometrisch abgeschätzt werden. Nachteilig ist, dass dadurch das Einzelpotential eine konstante Breite über den Streckenabschnitt behält und die Radien nicht berücksichtigt werden. Genauer ist es, wenn von den berechneten Schiffsphasen (Abbildung 5-60,

mitte) oder der Schleppfläche (rechts) plus ggf. Sicherheitsabstand ausgegangen wird. Hierbei werden die variierenden Breiten bei einer Fahrt berücksichtigt und die zusätzlichen Einzelpotentiale für den Begegnungsverkehr können entwickelt werden.

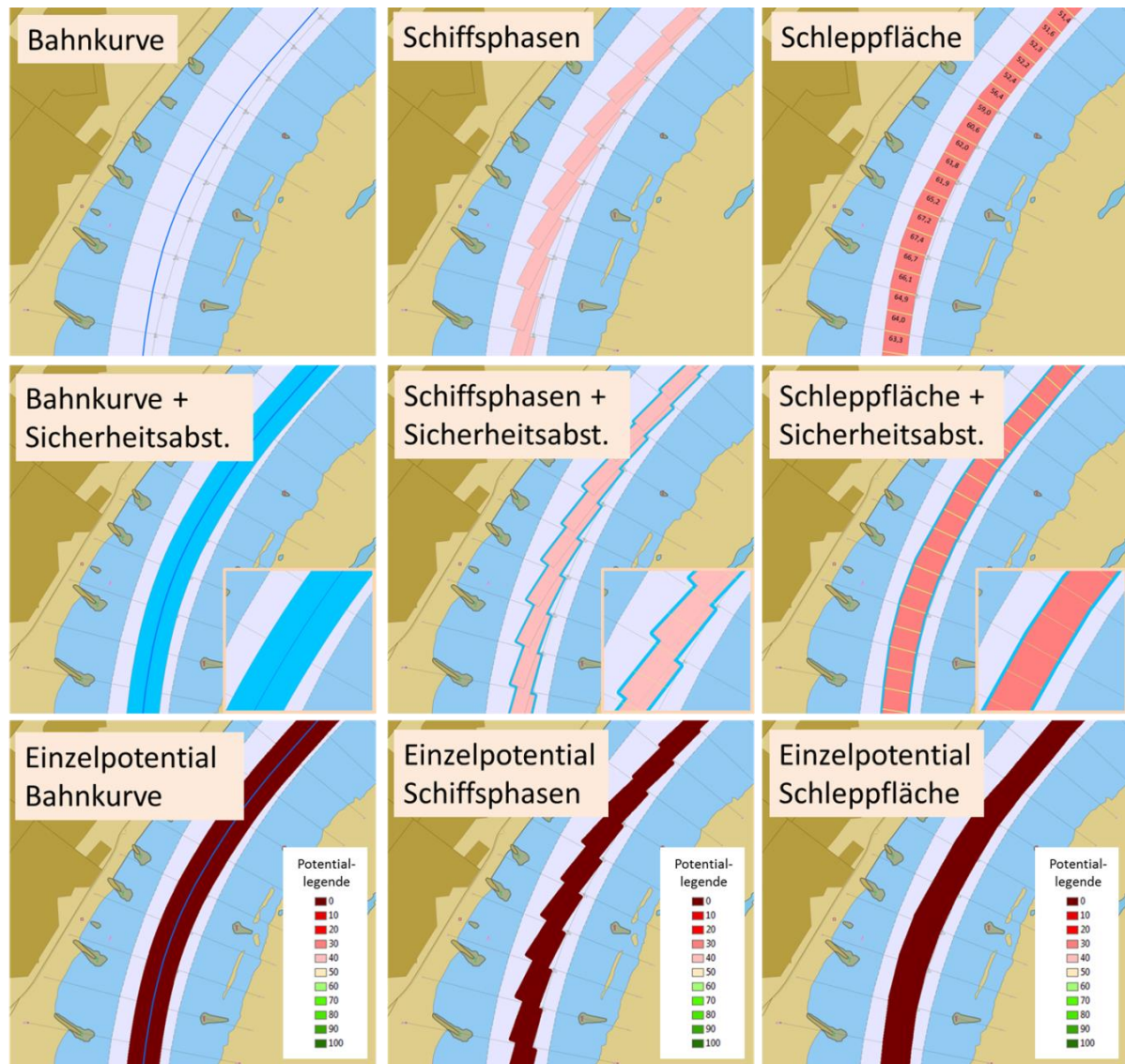


Abbildung 5-60: Unterschiedliche Möglichkeiten der Einzelpotentialentwicklung zur Vorbereitung einer Begegnungssituation (exemplarisch mit einem 6SV zu Tal, 3R2G, dreireihig und zweigliedrig, Länge 193,0 m, Breite 34,2 m)

Exemplarisch wird aus den Einzelpotentialen der Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten aus dem Strömungsmodell und dem erstellten Einzelpotential der Schleppfläche zu Tal eines 6SV 3R2G (Länge 193,0 m und Breite 34,2 m) ein Gesamtpotential zu Berg entwickelt. Abbildung 5-61 (links) zeigt dieses Gesamtpotential zu Berg bei einem Mittelwasserabfluss unter Berücksichtigung einer Begegnungssituation. Das Gesamtpotential ist in der Abbildung 5-61 (rechts) überlagert mit aufgezeichneten 6SV zu Tal (3R2G) und zu Berg (2R3G) dargestellt. Die Länge und Breite des 6SV zu Berg beträgt 269,5 m und 22,8 m.

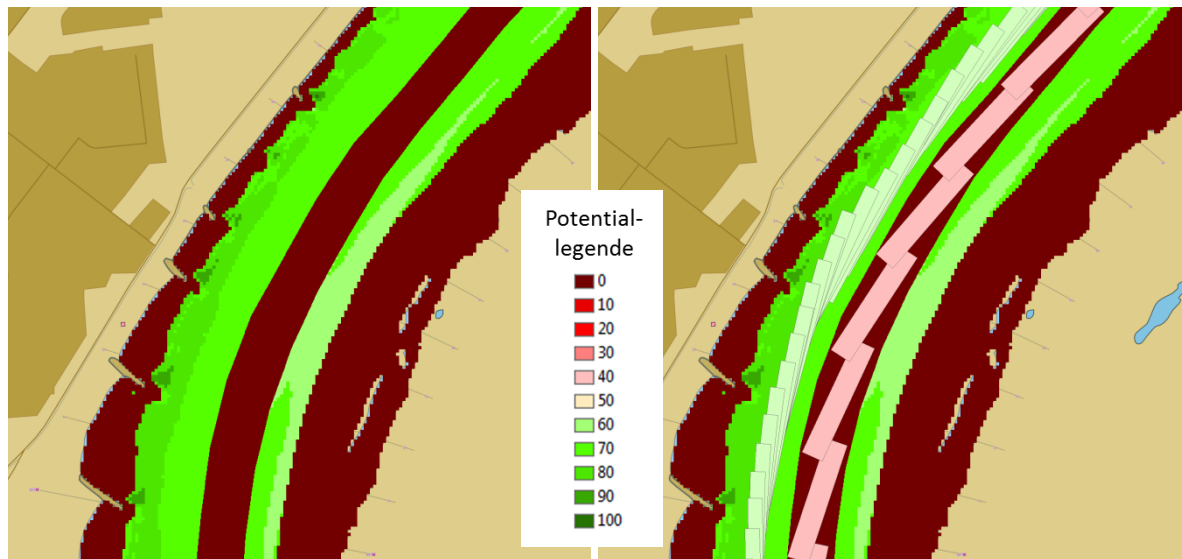


Abbildung 5-61: Gesamtpotential zu Berg unter Berücksichtigung einer Begegnungssituation (links) und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsphasen zweier 6SV (rechts) zu Tal (3R2G, rot) und Berg (2R3G, grün)

Basierend auf dem Gesamtpotential zu Berg kann eine Basisleitlinie abgeleitet und - analog wie für die Talfahrt - mit den Anpassungsfunktionen die Schiffsphasen, Schleppflächen und Fahrspurbreiten bestimmt werden. Anschließend werden die Schleppflächen zu Tal und Berg auf Überschneidungen und ausreichende Sicherheitsabstände Schiff / Schiff bzw. Schiff / Ufer überprüft und ggf. - sofern möglich - die Basisleitlinien variiert und ein neuer Durchlauf gestartet. Ähnlich wie in Abbildung 5-59 in Kapitel 5.3.5 nur für die Talfahrt eines TMS dargestellt, können hier die Fahrspurbreiten der 6SV für die Berg- und Talfahrt zuzüglich Sicherheitsabstände aufsummiert und mit der vorgehaltenen Fahrrinnenbreite (Kapitel 5.1.2) verglichen werden.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Leistungsfähigkeit einer Wasserstraße langfristig zu erhalten bzw. zu erhöhen, müssen geeignete Simulationsverfahren und Werkzeuge entwickelt werden, welche die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen ermitteln. Durch die sich stetig verändernden Randbedingungen und Anforderungen von Binnenwasserstraßen ist eine Ermittlung der Befahrbarkeit eine immer wiederkehrende Aufgabe und Herausforderung. Ein allgemeingültiges oder ganzheitliches Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen existiert nicht.

Im Rahmen der Dissertation wird aufgezeigt, dass durch geeignete Kombination nautisch relevanter Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen, die Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen visualisiert und bewertet werden kann. Neben der Geometrie eines Fließgewässers, den Ergebnissen hydrodynamisch-numerischer Flussgebietsmodelle und den Kenngrößen eines Binnenschiffes bzw. den Fahrrinneneigenschaften, werden Informationen aus der Inland Electronic Navigational Chart (Inland ENC) sowie ergänzende Verkehrsregeln in dem entwickelten Bewertungsverfahren *RiNA* (*River Navigation Assessment*) berücksichtigt.

Nach der Überführung der unterschiedlich komplexen Eingangsdaten in ein gemeinsames Geoinformationssystem werden aus nautisch relevanten Kenngrößen (u. a. Fließgeschwindigkeiten, Fließtiefen, Fahrrinnenanforderungen, Tiefgang, Verkehrsregeln, Objekten aus der Inland ENC) sogenannte Einzelpotentiale generiert. Hierfür wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, um die interdisziplinären, teils vektorbasierten Geodaten in der Fläche mathematisch verarbeiten zu können. Für die Potentialentwicklung von Objekten aus der Inland ENC steht ein konstantes oder distanzbasiertes Verfahren zur Wahl. Bei der Potentialentwicklung aus Strömungskenngrößen wurden mehrstufige Verfahren unter Berücksichtigung der Fahrrinneneigenschaften bzw. der Kenngrößen eines Binnenschiffes entwickelt. Die erstellten Einzelpotentiale werden durch geeignete Kombinationen in Gesamtpotentiale überführt. Die Gesamtpotentiale stellen eine flächige Verteilung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen im ungestörten Verkehr unter Berücksichtigung stationärer Strömungskenngrößen, Binnenschiffs- bzw. Fahrrinneninformationen und u. a. Objekten aus der Inland ENC dar. Diese sogenannten Befahrbarkeitspotentiale können für unterschiedliche Abflussszenarien, Fahrrinnenanforderungen, Schiffstypen, Veränderung des Tiefgangs, Fahrtrichtung etc. aufbereitet werden. Grundlage für eine Validierung des Bewertungsverfahrens *RiNA* bilden aufgezeichnete Fahrten (Berg- und Talfahrt) von Binnenschiffen unterschiedlichen Typs (TMS, GMS und SV), Abladetiefen und Abmessungen (Länge und Breite), bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser) auf dem Rhein mit seiner abwechslungsreichen Streckencharakteristik (Oberrhein mit Rheingau, Gebirgsstrecke im Mittelrhein sowie Niederrhein). Darauf aufbauend können z. B. Gewässerabschnitte, Fahrrinnen und aufgezeichnete bzw. simulierte Schiffsfahrten objektiv analysiert, bewertet und verglichen werden. Befahrbarkeitsanalysen sind ein wichtiges Analyse- und Planungsinstrument um z. B. die Nutzung einer Wasserstraße für größere Fahrzeuge zuzulassen, vorhandene Engstellen zu identifizieren oder die Fahrrinnentrassierung zu optimieren.

Die Umsetzung des Bewertungsverfahrens *RiNA* in einem Softwaresystem wurde für den ungestörten Verkehr entwickelt und kann sowohl für klein- als auch großräumige Untersuchungen durch Definition der Zellauflösung eingesetzt werden. Es weist zudem eine räumliche Flexibilität durch Wahl des Zielkoordinatensystems auf. Das Bewertungsverfahren ist eine Fachanwendung mit modularem Aufbau. Die Methodik des Verfahrens ist universell für verschiedene Kenngrößen einsetzbar, sodass weitere Einzelpotentiale je nach Fragestellung und Zielsetzung entwickelt und bei der Gesamtpotentialentwicklung berücksichtigt werden können.

Die Fallstudien am Rhein zeigen, wie die Einzel- und Gesamtpotentiale entwickelt und mit aufgezeichneten Schiffsfahrten validiert und analysiert werden können. Verschiedene Untersuchungen durch Variation der Strömungskenngrößen sowie Detailstudien einzelner Streckenabschnitte weisen den Nutzen und die vielfältigen Anwendungsbereiche des mit der Software *ArcGIS* kombinierten Bewertungsverfahrens *RiNA* auf. Zudem werden Hinweise auf die Entwicklung der Einzel- bzw. Gesamtpotentiale an einigen Besonderheiten innerhalb der Untersuchungsgebiete (z. B. Fahrrinnen-teilung oder Brückendurchfahrtsbereiche) gegeben. Es wird u. a. aufgezeigt, wie aufgezeichnete Schiffsfahrten aus Großausführungsmessungen analysiert, verglichen und bewertet werden können. Durch Auswertungen dieser Schiffsfahrten, Entwicklung von sogenannten Anpassungsfunktionen aus den Driftwinkel-Radiusbeziehungen und ergänzende Entwicklungen mit der Software *FME (Feature Manipulating Engine)* können durch Einzelpositionierung der Schiffsumrisse, die Schleppflächen und Fahrspurbreiten unterschiedlicher Schiffstypen, Güte der Fahrt und Fahrtrichtung basierend auf einer abgeleiteten Basisleitlinie oder einer Bahnkurve ermittelt werden. Dies ermöglicht eine Erweiterung der Untersuchungen innerhalb *RiNA* auf den fließenden Verkehr bei stationärer Fahrt. Die Schiffsphasen bzw. die Schleppflächen werden bei der Gesamtpotentialentwicklung im fließenden Verkehr in Form eines weiteren Einzelpotentials (z. B. bei Begegnungssituationen) in die Bewertung einbezogen.

Für die Betrachtungen des ungestörten Verkehrs bei der Potentialentwicklung kann das Verfahren auf weitere Fließgewässerabschnitte übertragen werden. Zur Berücksichtigung des fließenden Verkehrs bei der Potentialentwicklung (z. B. Begegnungsverkehr) wird empfohlen, aufgezeichnete Großausführungsmessungen aus dem zu betrachtenden Untersuchungsabschnitt einzubeziehen. Hier besteht Bedarf, die entwickelten Anpassungsfunktionen aus den Großausführungsmessungen je nach Schiffstyp und Fahrtrichtung hinsichtlich Abfluss, hydraulisch vergleichbaren Gewässerabschnitten und Vergleich unterschiedlicher Fließgewässerabschnitte weiter zu untersuchen, um eine Übertragbarkeit der Fahrspurbreitenabschätzung auf andere Gewässerabschnitte abzuleiten. Besonders bei der Bergfahrt wird empfohlen, die Schrittweite bei der Auswertung der Großausführungsmessungen um eine räumliche Diskretisierung zu erweitern.

Die Fallstudien belegen, dass das Verfahren *RiNA* und somit die Kombination der Einzelpotentiale zu Gesamtpotentialen als Bewertungsgrundlage funktioniert. Gewässerabschnitte, Fahrrinnen und aufgezeichnete bzw. simulierte Schiffsfahrten können objektiv analysiert, bewertet und verglichen werden. Über eine Schnittstelle können im Binnenschiffsführungssimulator berechnete Kenngrößen in dem Bewertungsverfahren *RiNA* mit den hydrodynamisch-numerischen Berechnungsergebnissen,



den entwickelten Einzel- bzw. Gesamtpotentialen oder verfügbaren Geodaten, wie z. B. Kartenmaterial, in einer flächigen Darstellung verknüpft und ausgewertet werden.

Das Bewertungsverfahren *RiNA* leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, aus einer Flut von Informationen zentrale Inhalte aufzubereiten, diese gewichtet zu kombinieren und darzustellen. Es bietet eine Plattform für die Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen und trägt somit zu einer Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse bei. Mit dem entwickelten Verfahren kann eine objektive Beurteilung und Bewertung der Wasserstraßen nach nautischen Gesichtspunkten (u. a. Fließgeschwindigkeit, Tiefgang, Schiffsgeschwindigkeit, Fahrrinnenbreite) durchgeführt sowie kritische Stellen aufgezeigt werden und dadurch zu einer optimierten Nutzung der Wasserstraßen beitragen.

Die Ergebnisse aus dem Bewertungsverfahren können sowohl zu Planungszwecken genutzt als auch für die Schifffahrt aufbereitet und unterstützend in Form eines Binnenschifffahrtswegweises (z. B. Befahrbarkeitspotentiale in der Inland ENC oder als Web Map Service) bereitgestellt werden. Die Befahrbarkeitspotentiale bieten ein objektives Vergleichsmedium für z. B. Fahrrinnenabschnitte und Schiffsfahrten und stellen zudem eine Grundlage für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (z. B. autonomes bzw. teilautonomes Fahren, Routenplanung) dar.

Zur vorausschauenden Bewertung von Verkehrssituationen sollte künftig die Einführung einer Zeitachse zur Bestimmung von Abfahrts- / Ankunftszeit und angepasster Schiffsgeschwindigkeit und eine Verknüpfung mit einem Bahnregler angestrebt werden. Mit zunehmender Rechnerleistung und z. B. über AIS-Schnittstellen könnten die in einem Untersuchungsgebiet verkehrenden Schiffe als ort- und zeitveränderliche Objekte in die Potentialberechnung einfließen und somit der fließende Verkehr zeitbezogen beurteilt werden. Ein solches Onlinesystem in der Binnenschifffahrt wäre bei der Betrachtung der Sicherheit in Form eines vorausschauenden Systems (z. B. Prädiktionssystem) oder hinsichtlich eines wirtschaftlich optimierten Verfahrens (z. B. Routenplanung, energiesparende Fahrweise) von Bedeutung.



---

## Literaturquellen

- [1] Abkowitz, M. A. (1964): Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Maneuvrability; Hydrodynamics Department; Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium, Denmark 1964.
- [2] Adolphi, S. (1998): Theoretische Betrachtungen zur Bestimmung der Fahrspurbreite von Schiffen in Fließgewässern; Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik; Karlsruhe 1998.
- [3] BAW (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen; Bundesanstalt für Wasserbau; Mitteilungsblatt Nr. 87, Karlsruhe 2004.
- [4] BAW (2007): Hydrodynamisch-numerische Rheinmodelle von Iffezheim bis Lobith (Rh-km 336,210 – 865,500); Bundesanstalt für Wasserbau; Karlsruhe 2007.
- [5] BAW (2012): Validierungsdokument der Bundesanstalt für Wasserbau für das üGMS Vigilia vom 31.05.2012.
- [6] BAW (2013): Fachwissenschaftliche Begleitung des Projekts „Abladeoptimierung Mittelrhein“; Hydro- und morphodynamische Modelluntersuchungen; Bundesanstalt für Wasserbau; Karlsruhe 2013.
- [7] BAW (2014): Präsentationsfolien der Bundesanstalt für Wasserbau zu der Vorlesung Verkehrswasserbau am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe 2014.
- [8] BAW (2014): Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen; Bundesanstalt für Wasserbau; Forschungsbericht, Karlsruhe 2014.
- [9] BAW (2015): Hydro- und morphodynamische Maßnahmenplanung zum Endzustand im Bergsenkungsgebiet des Rheins, Rhein-km 793 bis 808; Bundesanstalt für Wasserbau; Karlsruhe 2015.
- [10] Bleninger, T., Fenton, J. D., Jirka, G. H. (2006): Verfahrensbeschreibung des 1-D hydro-numerischen Modellsystems *CasCade+*, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2006.
- [11] BMVBS (2011): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen; Ausgabe 2011.
- [12] BMVBS (2014): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Der freifließende Rhein; Ermittlung von gleichwertigen Mittelwasserlinien am freifließenden Rhein; Kurzbericht Ergebnisse Teilziel 1; Arbeitsgruppe „Mittelwasserlinien“; Stand Oktober 2014.
- [13] BMVI (2014): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Verkehr in Zahlen 2014/2015; 43. Jahrgang; 26. September 2014.
- [14] BMVI (2015): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Längen der Hauptschifffahrtswege der Binnenwasserstraßen des Bundes (Teil 4); Zuordnung der dem allgemeinen Verkehr dienenden Binnenwasserstraßen des Bundes zu den Wasserstraßenklassen, bezogen auf die WSV; VV-WSV 11 03 – Teil 4; März 2015.
- [15] BMVI (2016): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Bundesverkehrswegeplan 2030, 2016.
- [16] Bollrich, G. et al. (1989): Technische Hydromechanik / 2; VEB Verlag für Bauwesen; 1989.
- [17] Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG) vom 2. April 1968 (BGBl. 1968 II S. 173), das zuletzt durch Artikel 4 Absatz 125 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist; 1968.
- [18] Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V. (2015): BDB, Daten & Fakten 2014/2015.

- [19] BVU, ITP, IVV, Planco (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030; Schlussbericht der BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, der Intraplan Consult GmbH, der Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG und der Planco Consulting GmbH; 11. Juni 2014.
- [20] Cascade (2000): Formelsammlung zu CASCADE; GENIAS Software GmbH, 2000.
- [21] CCNR (2011): Central commission for the Navigation of the Rhine; Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation (Inland ECDIS); Edition 2.3 (28.10.2011).
- [22] Chow, V. T. (1959): Open-Channel Hydraulics; University of Illinois; The Blackburn Press; Reprint of the 1959 Edition; New Jersey; USA (1959).
- [23] Cunge, J. A., Holly, F. M. Jr., Verwey, A. (1980): Practical Aspects of Computational River Hydraulics; Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- [24] Cura Hochbaum, A. (2006): Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction, 26<sup>th</sup> ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, 2006.
- [25] Dettmann, T. (1998): Ein Beitrag zur Berechnung von Fahrrinnenverbreiterungen in Kanal- bzw. Flusskrümmungen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten; Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (ZfB); Nr. 23 – I. Dezember-Ausgabe; 1998.
- [26] Dettmann, T., Harlacher, D. (2013): Fahrdynamik trifft Flusshydraulik – Ursachenermittlung zur Havarie des TMS Waldhof; Gemeinsamer Beitrag im Rahmen des 34. Duisburger Kolloquiums Schiffstechnik/Meerestechnik mit dem Thema „Das Schiff – Vorbeugung und Bewältigung von Havarien“; Veröffentlichung im Tagungsband; Duisburg 2013.
- [27] Durst, Franz (2006): Grundlagen der Strömungsmechanik – Eine Einführung in die Theorie der Strömungen von Fluiden; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Erlangen 2006.
- [28] Europäischen Union (2005): Richtlinie 2005/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. September 2005 über harmonisierte Binnenschifffahrtsweginformationssysteme (RIS) auf den Binnenwasserstraßen der Gemeinschaft; Amtsblatt der Europäischen Union; Straßburg 2005.
- [29] Feierfeil, T. (2015): Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten auf Basis von Naturmessungen; Beitrag im Rahmen des BAW-UDE-DST-Kolloquiums „Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen“; Veröffentlichung im Tagungsband; Karlsruhe 2015.
- [30] Ferziger, J. H., Peric, M. (1996): Computational Methods for Fluid Dynamics; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 1996.
- [31] Ferziger, J. H., Peric, M. (2008): Numerische Strömungsmechanik; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Erlangen 2008.
- [32] Forkel, C. (2004): Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis: Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte; Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; Shaker Verlag; Aachen 2004.
- [33] Fossen, T. I. (2012): Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons Ltd., reprinted 2012.
- [34] FZI (2015): Abschlusspräsentation der Softwareentwicklung *RiNA – River Navigation Assessment Tool*; Forschungszentrum für Informatik; Karlsruhe, Dezember 2015.
- [35] FZI (2016): *River Navigation Assessment Tool - RiNA*; Benutzerhandbuch; Forschungszentrum für Informatik; Karlsruhe, Mai 2016.
- [36] Graewe, H. (1971): Beitrag zur Frage der Bemessung von Fahrwasserverbreiterungen in Kanal- und Flusskrümmungen; Die Bautechnik; Zeitschrift für das gesamte Bauingenieurwesen, Berlin 1971.
- [37] Gronarz, A. (1997): Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit der Wassertiefe; Dissertation; Duisburg 1997.

- 
- [38] Gronarz, A. (2015): Anwendung von Schiffsführungssimulationen für die nautische Bewertung, Beitrag zum Kolloquium Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen, Karlsruhe, November 2015.
- [39] Grundgesetz (GG) für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 11. Juli 2012 (BGBl. I S. 1478) geändert worden ist; Bonn 1949.
- [40] Harlacher, D., Zentgraf, R. (2013): Strömungsinformationen in der Inland ENC; Beitrag im Rahmen des BAW/UDE Kolloquiums „Havarie des TMS Waldhof – Bergung, Analysen, Einsichten“; Veröffentlichung im Tagungsband; Karlsruhe 2013.
- [41] Harlacher, D. (2014): Hydraulische und fahrdynamische Bewertung der Ein- / Ausfahrtssituation am Schutzhafen Loreley (Mittelrhein); Beitrag im Rahmen des 35. Duisburger Kolloquiums Schiffstechnik / Meerestechnik mit dem Thema „Das Schiff und die Wasserwege“; Veröffentlichung im Tagungsband; Duisburg 2014.
- [42] Harlacher, D., Zentgraf, R., Dettmann, T. (2015): Investigation of the capsize of a tank motor ship by means of an inland ship handling simulator, Journal of Applied Water Engineering and Research (JAWER), April 2015.
- [43] Harlacher, D. (2016): Assessment procedure of the trafficability of inland waterways, 12<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics (HIC), “Smart Water for the Future”, Incheon, Korea, August 2016.
- [44] Hecht/Berking/Büttgenbach/Jonas (1999): Die elektronische Seekarte: Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen eines neuen Navigationssystems; H. Wichmann Verlag - Heidelberg 1999.
- [45] Hecht/Berking/Büttgenbach/Jonas/Alexander (2009): The Electronic Chart: Functions, Potential and Limitations of a New Marine Navigation System; Second Edition; Geomares Publishing – Lemmer; The Netherlands 2009.
- [46] Heinzelmann, C., Dettmann, T., Zentgraf, R. (2009): Hydraulisch-fahrdynamische Modelle zur Optimierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen; WasserWirtschaft 4/2009.
- [47] Heinzelmann, C., Dettmann, T., Zentgraf, R. (2009): Optimierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen am Beispiel des Rheins; HTG-Kongress; Lübeck, September 2009.
- [48] Hervouet, J.-M. (2008): Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method; John Wiley & Sons, Ltd.; 2008.
- [49] Hinze, J. O. (1975): Turbulence; Second Edition; McGraw-Hill series in mechanical engineering; 1975.
- [50] Höfer & Bechtel (2004): Handbuch *Trasse* - Trassierung von Fahrrinnen unter MicroStation<sup>TM</sup>, Version 2.0.x; 1999-2004.
- [51] Höfer & Bechtel (2005): Handbuch *Petra* – Pegeldynamische Trassierung von Fahrrinnen unter MicroStation<sup>TM</sup>, Version 6.0.x, Mainhausen 2000-2005.
- [52] Jaeger, C. (1949): Technische Hydraulik; Verlag Birkhäuser; Basel 1949.
- [53] Jirka, G. H. et al. (2005): Gerinnehydraulik; Vorlesungsskript des Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe; Karlsruhe 2005.
- [54] Kobus, H. et al., DVWK Schriften 39 (1984): Wasserbauliches Versuchswesen; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK); Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin, Stuttgart 1984.
- [55] Lantermann, U. et al. (2015): Maßstabeffekte und Umwelteinflüsse bei der Vorhersage des Manövrierhaltens seegehender Schiffe – PREMAN, Bericht zum Teilvorhaben MANÖ-DYN, BMWI FK 03SSX324B, 2015.
- [56] Lecheler, S. (2011): Numerische Strömungsberechnung; 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage; Vieweg + Teubner Verlag; Springer Fachmedien; Bad Tölz 2011.

- [57] LUBW (2003): Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 4 - Numerische Modelle zur Strömungssimulation; 1. Auflage; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 2003.
- [58] Lutz, A., Dettmann, T., Zentgraf, R. (2014): Virtuelle Navigation für Binnenschiffe in Fließgewässern; XXXIII. Internationaler Schifffahrtskongress; San Francisco, USA; Juni 2014.
- [59] Malcherek, A. (2001): Hydromechanik der Fließgewässer; Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen; Universität Hannover; 2001.
- [60] Malcherek, A. (2002): Numerische Methoden der Strömungsmechanik; Vorlesungsskript; Version 5.6; Universität der Bundeswehr München; Institut für Wasserwesen.
- [61] Martin, H. (2011): Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Dresden 2011.
- [62] Musall, M. (2011): Mehrdimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle im praxisorientierten und operationellen Einsatz; Karlsruher Institut für Technologie; Dissertation; Karlsruhe 2011.
- [63] Naudascher, E. (1987): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke; Springer-Verlag Wien - New York, Karlsruhe 1987.
- [64] Norrbin, N. H. (1971): Theory and observations on the use of a mathematical model for ship manoeuvring in deep and confined waters, Publications of the swedish state shipbuilding experimental tank, Nr 68, Göteborg 1971.
- [65] Oberle, P. (2004): Integrales Hochwassersimulationssystem Neckar - Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragung -; Universität Karlsruhe; Dissertation; Karlsruhe 2004.
- [66] Oertel, H., Laurien, E. (1995): Numerische Strömungsmechanik; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; Karlsruhe 1995.
- [67] Oltmann, P. (1978): Bestimmung der Manövriereigenschaften aus den Bahnkurven freimanövrierender Schiffsmodelle, Institut für Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, Schriftenreihe Schiffbau, Bericht Nr. 364, Februar 1978.
- [68] Oltmann, P., Sharma, S. D. (1984): Simulation of Combined Engine and Rudder Maneuvers using an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions; Schriftenreihe Schiffbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH); Hamburg, September 1984.
- [69] PIANC-IAPH (1995): Approach Channels – Preliminary Guidelines; First Report of the Joint PIANC-IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA; Belgium, April 1995.
- [70] PIANC-IAPH (1997): Approach Channels – A Guide for Design; Final Report of the Joint PIANC-IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA; Belgium, June 1997.
- [71] Rheinmetall Defence Electronics (RDE) GmbH (2008): Advanced Nautical Simulator 5000 (ANS 5000), Software Requirement Specification (SRS), Ownship Manager, Bremen, 2008.
- [72] Rodi, W. (1979; 1993; 2000): Turbulence Models and Their Application in Hydraulics; A state-of-the-art review; IAHR/AIRH Monograph; Taylor & Francis; 2000.
- [73] Scherer, M. (2015): Kombinierte Auswertung und Analyse hydrodynamisch-numerischer Strömungsberechnungen und aufgezeichneter Schiffsfahrten auf dem Rhein; Bachelorarbeit Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); September 2015.
- [74] Schröder et al., DVWK Schriften 92 (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK); Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin, Obernach 1990.
- [75] Sharma, S. D. (1982): Kräfte am Unter- und Überwasserschiff; 18. Fortbildungskurs; Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, März 1982.



- 
- [76] Söhngen, B., Eloit, K. (2014): Sachstand der PIANC Incom WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen; XXXIII. Internationaler Schifffahrtskongress; San Francisco, USA; Juni 2014.
- [77] Statistisches Bundesamt (2015): Verkehr aktuell 09/2015; Fachserie 8; Reihe 1.1; erschienen am 30.09.2015; Wiesbaden, September 2015.
- [78] Telemac Modelling System (2013): TELEMAT-2D Software, Release 6.2, OPERATING MANUAL; EDF-R&D; July 2013.
- [79] VBW (2013): Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e. V.; Fahrdynamik von Binnenschiffen; Schifffahrtsverlag »Hansa« GmbH & Co. KG, Hamburg 2013.
- [80] VBW (2014): Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e. V.; Schiffsführungs-simulatoren in der Binnenschifffahrt; Duisburg 2014.
- [81] Wolff, K. (1981): Ermittlung der Manövriereigenschaften fünf repräsentativer Schiffstypen mit Hilfe von CPMC-Modellversuchen, Institut für Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, Schriftenreihe Schiffbau, Bericht Nr. 412, Dezember 1981.
- [82] WSV (2003): ARGO – Probetrieb mit Tiefeninformationen auf zwölf Güterschiffen in der Rhein-strecke von Mainz bis Kaub von Oktober 2000 bis Februar 2002; Schlussbericht der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest; Mainz 2003.
- [83] WSV (2007): Organisatorische und technische Daten, Binnenschifffahrt – Aufgaben – Wasser-straßen; Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest; Mainz 2007.
- [84] WSV (2010): Durchführung einer Engpassanalyse am Rhein (EPA); Abschlussbericht 2010.
- [85] WSV (2014): Binnenschifffahrtsuntersuchungsordnung (BinSchUO); Stand: 25. Juni 2014.
- [86] WSV (2014): Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV); Stand: 01. Dezember 2014.
- [87] Zielke, W. et al., DVWK Schriften 127 (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küsten-gewässern; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK); Kommissions-vertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 1999.
- [88] ZKR (2006): Zentralkommission für die Rheinschifffahrt; Standard; System zur elektronischen Darstellung von Binnenschifffahrtskarten und von damit verbundenen Informationen; Inland ECDIS; Edition 2.0; 23.11.2006.
- [89] ZKR (2013): Zentralkommission für die Rheinschifffahrt; Ausgabe der umfangreichen Anlagen der Beschlüsse 2013-I-23; Straßburg 2013.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Freiheitsgrade eines starren Schiffskörpers im schiffsfesten Koordinatensystem .....	8
Abbildung 2-2:	Definition der Koordinatensysteme (ebene Darstellung) (verändert nach <i>Gronarz, 1997 [37]</i> ) .....	8
Abbildung 2-3:	Darstellung der benötigten Fahrspurbreite (blau), der Schleppfläche (gelb) und der Schiffsphasen (rot) in einer Kurvenfahrt am Beispiel einer Großausführungsmessung .....	13
Abbildung 2-4:	Aus Großausführungsmessungen in Stillgewässern abgeleitete Driftwinkel in Abhängigkeit des Kurvenradius für einen Schubverband mit 185 m Länge ( <i>BAW, 2014 [7]</i> ) .....	14
Abbildung 2-5:	Fahrspurbreite eines Schiffes bei der Kurvenfahrt (verändert nach <i>BAW, 2004 [3]</i> ) (Taktischer Drehpunkt zwischen Schiffsmitte und Bug) .....	15
Abbildung 2-6:	Fahrspurbreite eines Schiffes bei der Kurvenfahrt (Taktischer Drehpunkt vor dem Schiff) .....	16
Abbildung 2-7:	Aus Driftwinkel abgeleitete <i>C<sub>f</sub></i> -Werte in Abhängigkeit des Kurvenradius für einen Schubverband mit 185 m Länge ( <i>C<sub>f</sub></i> -Wert etwa 0,9) ( <i>BAW, 2014 [7]</i> ) .....	17
Abbildung 2-8:	Empfehlungen zum <i>C<sub>f</sub></i> -Wert (abgeleitet aus Naturuntersuchungen) für verschiedene Wasserstraßenklassen zur Berechnung der Fahrspur- bzw. Fahrrinnenbreite ( <i>BMVBS, 2011 [11]; Dettmann, 1998 [25]</i> ) .....	18
Abbildung 2-9:	Fahrspurbreitenbedarf eines Binnenschiffes in einem fließenden Gewässer zu Berg (verändert nach <i>Heinzelmann et al., 2009 [46]</i> ) .....	19
Abbildung 2-10:	Fahrspurbreitenbedarf eines Binnenschiffes in einem fließenden Gewässer zu Tal (verändert nach <i>Heinzelmann et al., 2009 [46]</i> ) .....	19
Abbildung 2-11:	<i>C<sub>f</sub></i> -Werte für Gütermotorschiff (GMS) abgeleitet aus Messkampagnen ( <i>BAW, 2014 [8]</i> ) .....	20
Abbildung 2-12:	Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Modellierung (verändert nach <i>Forkel, 2004 [32]; Oberle, 2004 [65]</i> ) .....	22
Abbildung 2-13:	Modellierungsmethode 1D, 2D oder 3D .....	24
Abbildung 2-14:	Grundgleichungen im Wasserbau .....	26
Abbildung 3-1:	Verschiedene Aspekte und Komponenten der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen .....	29
Abbildung 3-2:	Darstellung eines Electronic Chart Display and Information Systems for Inland Navigation .....	33
Abbildung 3-3:	Inland ENC eines Rheinabschnittes im Bereich des Loreleyhafens (links) und Überlagerung mit dem Radarbild (rechts) .....	34
Abbildung 3-4:	Exemplarische Darstellung eines Profilquerschnittes mit Referenzwasserspiegellage und Umsetzung der Tiefeninformationen in der Inland ENC im Vierfarbenmodus ( <i>Harlacher, Zentgraf, 2013 [40]</i> ) .....	35
Abbildung 3-5:	Farblich abgestufte Tiefeninformationen in der Inland ENC exemplarisch dargestellt im Zweifarben- (links) und Vierfarbenmodus (rechts) ( <i>Harlacher, Zentgraf, 2013 [40]</i> ) ....	36
Abbildung 3-6:	Differenz der Wasserspiegellagen bei Mittel- und Hochwasser mit der Referenzwasserspiegellage (Niedrigwasser) zwischen Rhein-km 500,0 und 600,0 ( <i>Harlacher, Zentgraf, 2013 [40]</i> ) .....	37
Abbildung 3-7:	Lokale Anwendungsbereiche für die Darstellung bzw. Bereitstellung der Fließgeschwindigkeiten: (a) Zufluss (Einmündung von Nebenflüssen, Einleitungen etc.); (b) Wasserstandabhängige Querströmungen (z. B. Tauberwerth bei Oberwesel); (c) Hinweis auf gefährliche Strömungen bei Hochwasser (z. B. Gefahrenzone am Betteck) .....	38
Abbildung 3-8:	Mittlere Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasser zwischen Rhein-km 500,0 und 600,0 ( <i>Harlacher, Zentgraf, 2013 [40]</i> ) .....	38
Abbildung 3-9:	Erfassung der Veränderlichkeit der Wasserspiegellagen über geeignete Schnittstellen (Pegelanbindung, Strömungsmodell) im Inland ECDIS .....	39
Abbildung 3-10:	Engpassstelle I im Rheingau bei Hattenheim (links) und Engpassstelle VI in der Gebirgsstrecke bei Assmannshausen (rechts) im Niedrigwasserbereich (GIW) mit	

	einem Tiefenanspruch von 2,2 m bzw. im Mittelwasserbereich (MW) mit einem Tiefenanspruch von 3,3 m (WSV, 2003 [82]) .....	40
Abbildung 3-11:	Bündelung der aufgezeichneten Bahnkurven zu Berg (links) und Tal (rechts) im Bereich der Gebirgsstrecke bei Assmannshausen in der Engpassstelle VI .....	42
Abbildung 3-12:	Taktischer Drehpunkt und Schleppkurve durch Einzelpositionierung (Heinzelmann et al., 2009 [46]) .....	44
Abbildung 3-13:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials am Profilquerschnitt bei Rhein-km 551,3 (BAW, 2014 [8]) .....	46
Abbildung 3-14:	Binnenschiffsführungssimulator ANS5000 der BAW Karlsruhe .....	47
Abbildung 3-15:	Vorbereitung des Binnenschiffsführungssimulators (Harlacher, 2014 [41]) .....	48
Abbildung 3-16:	Erstellung eines verfeinerten Geländemodells mit generischen Texturen für eine Simulationsfahrt nach Sicht bzw. Radar (hier im Bereich Oberwesel) (Harlacher et al., 2015 [42]) .....	49
Abbildung 3-17:	Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen (Niedrig-, Mittel-, Hochwasser etwa bei Hochwassermarken I und II) aus einem tiefengemittelten 2D-HN-Modell (Harlacher, 2014 [41]) .....	50
Abbildung 3-18:	Integration der Sohldaten und tiefengemittelten Strömungsdaten in eine Inland ENC (Dettmann, Harlacher, 2013 [26]) .....	50
Abbildung 3-19:	Modellierung eines Schiffsmodells (hier: TMS Waldhof) .....	51
Abbildung 3-20:	Durchführung von Simulationsfahrten an einem Binnenschiffsführungssimulator .....	52
Abbildung 4-1:	Bestandteile des Verfahrens RiNA zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen .....	56
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung zur Verfahrensentwicklung .....	66
Abbildung 4-3:	Exemplarische Darstellung möglicher Potentiallegenden z. B. von 0 bis 100 und einer Diskretisierung von 10 (links) .....	67
Abbildung 4-4:	Exemplarische Potentialentwicklung aus nautisch relevanten Informationen aus der Inland ENC; z. B. für Fahrrinnenbereich (Potential 100), besetzte Liegestellen (Potential 0), Begegnungsverbot (Potential 0, nur bei Untersuchungen des fließenden Verkehrs), Fahrrinnenbegrenzungstonnen (Potential 0) u. a. ....	69
Abbildung 4-5:	Potentialentwicklung einer Fahrrinnenbegrenzungstonne: Lage aus der Inland ENC (links); Sicherheitsabstand 5 m und Potentialwertvergabe 0 (mittig); mit zunehmendem Abstand von der Tonne abgestuftes Potential (rechts) (Harlacher, 2016 [43]) .....	70
Abbildung 4-6:	Potentialentwicklung um Buhnen: Lage entsprechend den Orthophotos bzw. aus der Inland ENC (links und mitte); Gewählter Sicherheitsabstand 10 m und abgestuftes Potential mit zunehmendem Abstand von den Buhnen (rechts) .....	71
Abbildung 4-7:	Distanzbasiertes Potentialentwicklungsverfahren einer Fahrrinne mit inverser Reklassifizierung .....	71
Abbildung 4-8:	Potentialentwicklung aus nautisch relevanten Zusatzinformationen (hier: Talfahrer möglichst in der Mitte zwischen Hochwassermarken I und II im Richtpegelabschnitt) (Harlacher, 2016 [43]) .....	72
Abbildung 4-9:	Exemplarische Darstellung der Fließtiefen (links) und Fließgeschwindigkeiten (rechts) aus einem 2D-HN-Modell bei einem Hochwasserabfluss .....	73
Abbildung 4-10:	Exemplarische Potentialentwicklung der Fließtiefen aus dem HN-Modell mit einem oberen Tiefenfreigabewert von 5 m (Normierung) und einem Tiefenanspruch von 3 m (Reklassifizierung) .....	74
Abbildung 4-11:	Exemplarische Potentialentwicklung der Fließgeschwindigkeiten aus dem HN-Modell mit einer Geschwindigkeitsgrenze von 2,8 m/s (10 km/h; Normierung) in der Talfahrt (Reklassifizierung) .....	75
Abbildung 4-12:	Gegenüberstellung der Einzelpotentialentwicklung der Fließgeschwindigkeit für die Tal- und Bergfahrt (Harlacher, 2016 [43]) .....	76
Abbildung 4-13:	Exemplarische Gesamtpotentialentwicklung: Vertikale Superponierung gewichteter Bearbeitungsebenen und reklassifizierte Ergebnisebene mit Berücksichtigung beschränkter (nicht befahrbarer) Bereiche .....	78
Abbildung 4-14:	Exemplarische Darstellung der Gesamtpotentialentwicklung aus zwei gewichteten Strömungsinformationen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) bei der Talfahrt bei einem Hochwasserabfluss (Harlacher, 2016 [43]) .....	79

Abbildung 4-15:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials bei Hochwasser zu Tal aus Strömungsinformationen (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) und weiteren Objekten aus der Inland ENC: Zu den Strömungsinformationen wurde die Fahrrinne (links) und weitere Objekte (u. a. Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Hochwasserregel) berücksichtigt (rechts) .....	80
Abbildung 4-16:	Darstellung der aufgezeichneten Schiffsfahrten von Schubverbänden (2SV, einreihig, zweigliedrig) zu Berg (links) und zu Tal (rechts) im Bereich des Schutzhafens Loreley bei Rhein-km 555.....	82
Abbildung 4-17:	Überlagerung einer Talfahrt eines Schubverbandes bei Hochwasser mit der Inland ENC (links) und dem Gesamtpotential (rechts) .....	83
Abbildung 4-18:	Befahrbarkeitspotential zu Tal (links) aus Strömungsinformationen, nautischen Informationen aus der Inland ENC und ergänzend wurden die Beschränkungen der Schifffahrt bei Hochwasser nach der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV § 10.01) berücksichtigt; Potentialquerschnittsverlauf entlang der blauen Linie (rechts).....	84
Abbildung 4-19:	Schema zur Darstellung der Eigen-, Fremd- und kombinierten Leistung bei der Entwicklung des Bewertungsverfahrens <i>RiNA</i> bzw. der Software .....	85
Abbildung 4-20:	Agiles Vorgehensmodell bei der Softwareentwicklung ( <i>FZI, 2015 [34]</i> ).....	86
Abbildung 4-21:	Architekturkomponenten von <i>RiNA</i> (verändert nach <i>FZI, 2015 [34]</i> ).....	87
Abbildung 4-22:	Allgemeiner Workflow in <i>RiNA</i> (Übersicht) ( <i>FZI, 2016 [35]</i> ) .....	87
Abbildung 4-23:	Auszug aus der Konfigurationsdatei von <i>RiNA</i> .....	88
Abbildung 4-24:	Aufbau des <i>RiNA-AddIn</i> mit der Hauptregisterkarte <i>Übersicht</i> .....	89
Abbildung 4-25:	Aufbau einer Projektstruktur zur Ablage der Daten bzw. Ergebnisse (links) und als vorgegebene Layerstruktur im Inhaltsverzeichnis von <i>ArcGIS</i> (rechts) .....	90
Abbildung 4-26:	Aufbau von <i>RiNA</i> mit der Hauptregisterkarte <i>Eingangsdaten</i> (links), <i>Einzelpotentiale</i> (mitte) und <i>Gesamtpotentiale</i> (rechts).....	91
Abbildung 4-27:	Aufbau von <i>RiNA</i> mit der Hauptregisterkarte <i>Analyse</i> .....	92
Abbildung 4-28:	Inhaltsverzeichnis und Ansichtsfenster aus der Benutzeroberfläche in <i>ArcGIS</i> .....	93
Abbildung 4-29:	Konvertierung der Punktinformationen (rot) aus dem Berechnungsnetz des HN-Modells (links) in Rasterinformationen (rechts) mit einer Auflösung von 5 m unter Berücksichtigung eines Randpolygons (blaue Linien) .....	94
Abbildung 4-30:	Eingabemaske für die Interpolation eines Strömungsraster: hier exemplarisch für die Interpolation eines Fließtiefenrasters (wd – water depth) bei einem Pegelstand von 150 cm am Pegel Kaub (PK) .....	95
Abbildung 5-1:	Untersuchungsgebiet am Ober- und Mittelrhein (Rhein-km 483,5 – 557,5) (verändert nach <a href="http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&amp;value=iencwms">http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&amp;value=iencwms</a> ; abgerufen am 01.08.2016) .....	97
Abbildung 5-2:	Untersuchungsgebiet am Niederrhein (Rhein-km 777,3 – 814,0) (verändert nach <a href="http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&amp;value=iencwms">http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/?parameter=visible&amp;value=iencwms</a> ; abgerufen am 01.08.2016) .....	98
Abbildung 5-3:	Fahrrinntiefen und -breiten des Rheins von Basel bis zu niederländischen Grenze (Quelle abgerufen am 01.08.2016 unter: <a href="http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/dateien/2011/Rhein_Fahrinntiefe_und-breite2011_2.pdf">http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/dateien/2011/Rhein_Fahrinntiefe_und-breite2011_2.pdf</a> ) .....	99
Abbildung 5-4:	Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse von Rhein-km 483,5 bis 557,5 (Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt).....	100
Abbildung 5-5:	Radien bezogen auf die Fahrrinnenachse von Rhein-km 777,3 bis 814,0 (Niederrheinabschnitt) .....	101
Abbildung 5-6:	Zonenauswertung der mittleren Wassertiefe (wd) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt.....	103
Abbildung 5-7:	Zonenauswertung der mittleren Fließgeschwindigkeiten (v) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Ober- bzw. Mittelrheinabschnitt.....	103
Abbildung 5-8:	Zonenauswertung der mittleren Wassertiefe (wd) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Niederrheinabschnitt .....	104
Abbildung 5-9:	Zonenauswertung der mittleren Fließgeschwindigkeit (v) in der Fahrrinne entlang der Fließstrecke über den Abfluss im Niederrheinabschnitt .....	104

Abbildung 5-10:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen.....	109
Abbildung 5-11:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrigwasser (PK086) für Rhein-km 489,6 (A), Rhein-km 494,4 (B) und Rhein-km 508,1 (C).....	110
Abbildung 5-12:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen.....	110
Abbildung 5-13:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrig- (PK050; links) bzw. Mittelwasser (PK224; rechts) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal .....	112
Abbildung 5-14:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal bei Mittelwasser (PK330; links) bzw. Hochwasser (PK460; rechts) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal .....	112
Abbildung 5-15:	Vergleich einer aufgezeichneten Fahrt eines Schubverbandes (D) bei Niedrigwasser (PK050) vor dem Hintergrund des berechneten Gesamtpotentials bei Rhein-km 526 .....	113
Abbildung 5-16:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei verschiedenen Abflüssen (PK050; PK224; PK460) bei Rhein-km 508 (A).....	113
Abbildung 5-17:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei verschiedenen Abflüssen (PK050; PK224; PK460) bei Rhein-km 518 (C).....	114
Abbildung 5-18:	Vergleich einer aufgezeichneten Fahrt zu Berg bei Hochwasser bei etwa Rhein-km 509 (G; Verlassen der Fahrrinne; links) und Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg bei Hochwasser (PK460) mit aufgezeichneten Schiffsfahrten (rechts) .....	114
Abbildung 5-19:	Vergleich einer aufgezeichneten Fahrt zu Berg bei Hochwasser (PK460) bei etwa Rhein-km 527 (H; An- und Ablegemanöver) .....	115
Abbildung 5-20:	Gegenüberstellung des Gesamtpotentials zu Berg (links) und Darstellung der Fließgeschwindigkeiten (rechts) bei einem Hochwasserabfluss (PK460) sowie aufgezeichnete Schiffsfahrten (I).....	115
Abbildung 5-21:	Veränderung des mittleren Einzelpotentials der Fließtiefen in der Fahrrinne bei der Talfahrt bei Niedrigwasser (PK086 mit 1,90 m) durch Variation des Tiefenanspruches (TA) von 1,60 m bis 2,50 m um jeweils 30 cm .....	116
Abbildung 5-22:	Darstellung des Einzelpotentials der Fließtiefen bei der Talfahrt für Rhein-km 516 bis 518 (B) bei Niedrigwasser (PK086) durch Variation des Tiefenanspruches von 1,60 m bis 2,50 m .....	117
Abbildung 5-23:	Darstellung des Einzelpotentials der Fließtiefen bei der Talfahrt für Rhein-km 524 bis 527 (C) bei Niedrigwasser (PK086) durch Variation des Tiefenanspruches von 1,60 m bis 2,50 m .....	117
Abbildung 5-24:	Veränderung des mittleren Einzelpotentials der Fließgeschwindigkeit in der Fahrrinne bei der Bergfahrt bei Hochwasser (PK460 mit 3,6 m/s) durch Variation der Geschwindigkeitsgrenze von 3,6 m/s bis 2,4 m/s um jeweils 0,3 m/s .....	118
Abbildung 5-25:	Darstellung des Einzelpotentials der Fließgeschwindigkeit bei der Bergfahrt für Rhein-km 529 bis 533 (A) bei Hochwasser (PK460) durch Variation der Geschwindigkeitsgrenze von 3,6 m/s bis 2,4 m/s.....	119
Abbildung 5-26:	Darstellung der aufgezeichneten Bergfahrten (oben) und der Fließgeschwindigkeiten (bei Mittelwasser PK224, unten) bei Rhein-km 509,2 (links) und Rhein-km 528,0 (rechts).....	120
Abbildung 5-27:	Kombiniertes Gesamtpotential aus Strömungskenngrößen (bei Mittelwasser PK224) und Inland ENC Objekten und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten der Bergfahrt (grün) und Talfahrt (rot) bei Rhein-km 528,0 .....	120
Abbildung 5-28:	Darstellung der aufgezeichneten Talfahrten (rot) und Bergfahrten (grün) im Bereich des Geisenrückens bei Rhein-km 552,3 für verschiedene Schiffstypen und Abflussbereiche .....	121
Abbildung 5-29:	Darstellung der ermittelten Gesamtpotentiale zu Berg bei Niedrigwasser (PK086) bei einem Tiefenanspruch von 1,90 m (links), 2,20 m (mitte) und 2,50 m (rechts) .....	122
Abbildung 5-30:	Entwicklung eines Gesamtpotentials aus Strömungskenngrößen bei Mittelwasser (PK330) und einigen Inland ENC-Objekten (wie z. B. Brückenpfeiler, Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Ponton, Uferbauten, Ankerplatzbereich) sowie	



	Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten im Bereich einer Brückendurchfahrt bei Rhein-km 496,4 für die Tal- (links) und Bergfahrt (rechts) ..... 123
Abbildung 5-31:	Entwicklung eines Gesamtpotentials aus Strömungskenngrößen bei Mittelwasser (PK330) und einigen Inland ENC-Objekten (wie z. B. Brückenpfeiler, Liegestellen, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Ponton, Uferbauten, Ankerplatzbereich) sowie Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten in der Bergfahrt im Bereich weiterer Brückendurchfahrten bei Rhein-km 493,6; 498,5; 500,9 und 504,4 ..... 123
Abbildung 5-32:	Alternative Gesamtpotentialentwicklung aus Strömungskenngrößen und gesonderten Einzelpotentialen zur Berücksichtigung der Brückendurchfahrtsregeln bei Rhein-km 496,4 zu Tal- (links) und Berg (rechts) sowie Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten bei Mittelwasser (PK330) ..... 124
Abbildung 5-33:	Darstellung der berechneten Gesamtpotentiale bei Hochwasser (PK460) zu Tal (oben) und zu Berg (unten) bei etwa Rhein-km 518 und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten ..... 125
Abbildung 5-34:	Darstellung der Fließgeschwindigkeiten bei etwa Rhein-km 518 bei Hochwasser (PK460) ..... 125
Abbildung 5-35:	Darstellung der berechneten Querströmungsanteile der Fließgeschwindigkeit auf die Fahrrinnenachse (Tal) bei etwa Rhein-km 518 bei Hochwasser (PK460) ..... 126
Abbildung 5-36:	Berechnete Strömungsanteile quer zur Fahrrinnenachse bei Hochwasser (PK460) ..... 126
Abbildung 5-37:	Flächige Darstellung der Querströmungsanteile zu Tal auf die Fahrrinnenachse bei Hochwasser (PK460, links) zwischen Rhein-km 553 bis 556 und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsfahrten (rechts) zu Tal (rot) und Berg (grün) ..... 127
Abbildung 5-38:	Kombinierte Darstellung der Auswertung der Querströmungsanteile auf die Bahnkurve und der Driftwinkelauswertung eines TMS (oben) und eines 2SV (unten) bei Hochwasser (PK460) in der Talfahrt ..... 128
Abbildung 5-39:	Kombinierte Darstellung der Auswertung der Querströmungsanteile auf die Bahnkurve und der Driftwinkelauswertung eines TMS (oben) und eines üGMS (unten) bei Hochwasser (PK460) in der Bergfahrt ..... 129
Abbildung 5-40:	Ableitung der Konturlinien aus der flächigen Darstellung eines Gesamtpotentials zu Tal bei einem Hochwasserabfluss mit bekannter Potentiallegende ..... 131
Abbildung 5-41:	Darstellung eines Gesamtpotentials im Inland ENC Datenformat S-57: Zur Optimierung der Darstellung der Befahrbarkeit können Potentialwertgrenzen vom Schiffsführer festgelegt werden z. B. farbliche Abgrenzung von Potentialwerten größer als 90 (links) oder größer als 80 (rechts) ..... 132
Abbildung 5-42:	Gesamtpotential in der Inland ENC ..... 133
Abbildung 5-43:	Navigationslinien in der Inland ENC (z. B. exemplarisch Fährlinien, Fahrrinnenbegrenzungslinien) ..... 134
Abbildung 5-44:	Bahnkurve in der Inland ENC zur Unterstützung des Schiffsführers ..... 134
Abbildung 5-45:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Tal in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen ..... 136
Abbildung 5-46:	Exemplarische Darstellung des Gesamtpotentials zu Tal bei Niedrigwasser (PR224) für Rhein-km 778,1 (A), Rhein-km 784,2 (B) und Rhein-km 794,2 (C) sowie der beschrifteten Fahrrinnenzonen ..... 137
Abbildung 5-47:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials zu Berg in der Fahrrinne bei verschiedenen Abflüssen ..... 137
Abbildung 5-48:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials bei Niedrigwasser (PR224) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal (links) und Berg (rechts) ..... 138
Abbildung 5-49:	Auswertung des mittleren Gesamtpotentials bei Mittelwasser (PR401) in der Fahrrinne und Vergleich mit aufgezeichneten Schiffsfahrten zu Tal (links) und Berg (rechts) ..... 139
Abbildung 5-50:	Überfahren eines nicht befahrbaren Gesamtpotentials zu Tal bei Rhein-km 794,2 (D) und zu Berg bei Rhein-km 781,9 (E) und 783,0 (F) bei Mittelwasser (PR401) ..... 139
Abbildung 5-51:	Exemplarische Entwicklung einer Basisleitlinie: Aus einem Gesamtpotential im ungestörten Verkehr (oben links) wird der Potentialbereich „größer als“ z. B. 70 selektiert, mit Achsdiskretisierungslinien verschnitten (oben rechts), eine

	Basisleitlinie (hier: Mittelachse) generiert (unten links) und ggf. variiert (unten rechts) .....	141
Abbildung 5-52:	Optimierte Basisleitlinie (rot) mit der Software <i>FME</i> (hier: Mittelachse) bei einem Potentialbereich „größer als“ z. B. 70 (Grüntöne) .....	141
Abbildung 5-53:	Exemplarische Darstellung der Driftwinkel über die Radian (log-verteilt) aus den Bahnkurven für mehrere 2SV zu Tal im Untersuchungsgebiet des Niederrheins .....	142
Abbildung 5-54:	Klasseneinteilung der Radian (hier: 2SV zu Tal) und Ermittlung der statistischen Kenngrößen aus den Driftwinkeln innerhalb der Klasseneinteilung (log-verteilt) .....	143
Abbildung 5-55:	Exemplarische Darstellung der Anpassungsfunktionen der 2SV zu Tal aus statistischen Kenngrößen der Driftwinkel für eine „gute, moderate und schwache Fahrt“ (log-verteilt) .....	144
Abbildung 5-56:	Erforderliche Eingabeparameter für die Entwicklung der Schiffsphasen, Schleppfläche und Fahrspurbreiten innerhalb der Software <i>FME</i> .....	147
Abbildung 5-57:	Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Schiffsphasen, Schleppfläche und der Fahrspurbreiten aus der Leitlinie bzw. Bahnkurve eines TMS zu Tal und Visualisierung in <i>ArcGIS</i> .....	148
Abbildung 5-58:	Exemplarische Darstellung der Entwicklung des unterschiedlichen Fahrspurbreitenbedarfs eines TMS zu Tal durch Variation der Koeffizienten anhand der Güte einer Fahrt (gut, moderat und schwach) .....	148
Abbildung 5-59:	Diagramm der Fahrspurbreiten aus der überlagerten Schleppfläche eines TMS zu Tal bei variierender Güte der Fahrt .....	149
Abbildung 5-60:	Unterschiedliche Möglichkeiten der Einzelpotentialentwicklung zur Vorbereitung einer Begegnungssituation (exemplarisch mit einem 6SV zu Tal, 3R2G, dreireihig und zweigliedrig, Länge 193,0 m, Breite 34,2 m) .....	150
Abbildung 5-61:	Gesamtpotential zu Berg unter Berücksichtigung einer Begegnungssituation (links) und Überlagerung mit aufgezeichneten Schiffsphasen zweier 6SV (rechts) zu Tal (3R2G, rot) und Berg (2R3G, grün) .....	151

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen .....	31
Tabelle 3-2:	Identifizierte Engpassstellen im Niedrig- (GLW) und Mittelwasserbereich (MW) (WSV, 2003 [82]) .....	42
Tabelle 4-1:	Gegenüberstellung der fahrdynamischen Verfahren <i>Trasse</i> , <i>Petra1D</i> und dem Binnenschiffsführungssimulator .....	59
Tabelle 4-2:	Nautisch relevante Objekte als Auszug aus der Objektliste der Inland ENC (Anhang 3) .....	63
Tabelle 4-3:	Reklassifizierungstabellen (dynamisch) der distanzbasierten Potentialentwicklung (Inland ENC Objekte) .....	70
Tabelle 4-4:	Reklassifizierungstabellen (dynamisch) der mehrstufigen Potentialentwicklung (Strömungskenngrößen) .....	76
Tabelle 4-5:	Reklassifizierungstabelle (dynamisch) bei der Gesamtpotentialentwicklung .....	81
Tabelle 5-1:	Pegelwerte und Abflüsse von Niedrig- bis Hochwasser bezogen auf den Pegel Kaub (Rhein-km 546,3) für die Untersuchungen des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes .....	102
Tabelle 5-2:	Pegelwerte und Abflüsse Von Niedrig- bis Hochwasser bezogen auf den Pegel Ruhrort (Rhein-km 780,8) für die Untersuchungen des Niederrheinabschnittes .....	102
Tabelle 5-3:	Nach Talfahrt und Schiffstyp aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (verändert nach <i>Scherer, 2015 [73]</i> ) .....	106
Tabelle 5-4:	Nach Bergfahrt und Schiffstypen aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (verändert nach <i>Scherer, 2015 [73]</i> ) .....	106
Tabelle 5-5:	Nach Talfahrt und Schiffstyp aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Niederrheinabschnittes .....	107
Tabelle 5-6:	Nach Bergfahrt und Schiffstypen aufbereitete Naturmessungen von Binnenschiffen im Bereich des Niederrheinabschnittes .....	107
Tabelle 5-7:	Parameter für die Potentialentwicklung im Bereich des untersuchten Ober- bzw. Mittelrheinabschnittes (Bezugspegel Kaub: PK) .....	108
Tabelle 5-8:	Parameter für die Potentialentwicklung im Bereich des Niederrheinabschnittes (Bezugspegel Ruhrort: PR) .....	135
Tabelle 5-9:	Zusammenfassung der Anpassungsfunktionen für verschiedene Schiffstypen, Fahrtrichtung und Güte der Fahrt im Untersuchungsgebiet des Niederrheins .....	145











## Anhang 1: Klassifizierung der Binnenwasserstraßen

Quelle abgerufen am 01.08.2016 unter:

[http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg\\_rhein/technische\\_daten/Wasserstrassenklasse.html](http://www.wsd-west.wsv.de/wasserstrassen/verkehrsweg_rhein/technische_daten/Wasserstrassenklasse.html)

### KLASSIFIZIERUNG DER EUROPÄISCHEN BINNENWASSERSTRASSEN

Typ der Binnenwasserstraße		Klasse der Binnenwasserstraße	MOTORSCHIFFE UND SCHLEPPKÄHNE Typ des Schiffes: Allgemeine Merkmale				SCHUBVERBÄNDE Art des Schubverbandes: Allgemeine Merkmale					Brückendurchfahrts- höhe 2)	Graphisches Symbol auf der Karte
			Bezeichnung	maxim. Länge L (m)	maxim. Breite B (m)	Tiefgang d (m) 7)	Tonnage T (t)	Formation	Länge L (m)	Breite B (m)	Tiefgang d (m) 7)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VON REGIONALER BEDEUTUNG	WESTLICH DER ELBE	I	Penische	38,5	5,05	1,8-2,2	250-400					4,0	—————
		II	Kempenaar	50-55	6,6	2,5	400-650					4,0-5,0	=====
		III	Gustav Koenigs	67-80	8,2	2,5	650-1 000					4,0-5,0	=====
	ÖSTLICH DER ELBE	I	Gross Finow	41	4,7	1,4	180					3,0	—————
		II	BM-500	57	7,5-9,0	1,6	500-630					3,0	=====
		III	8)	67-70	8,2-9,0	1,6-2,0	470-700		118-132 1)	8,2-9,0 1)	1,6-2,0	1 000-1 200	4,0
VON INTERNATIONALER BEDEUTUNG	IV	Johann Welker	80-85	9,50	2,50	1 000-1 500		85	9,50 8)	2,50-2,80 8)	1 250-1 450	5,25 od. 7,00 4)	—————
	V a	Große Rheinschiffe	95-110	11,40	2,50-2,80	1 500-3 000		95-110 1)	11,40	2,50-4,50	1 600-3 000	5,25 od. 7,00 od. 9,10 4)	=====
	V b							172-185 1)	11,40	2,50-4,50	3 200-6 000	9,10 4)	=====
	VI a							95-110 1)	22,80	2,50-4,50	3 200-6 000	7,00 od. 9,10 4)	=====
	VI b	3)	140	15,00	3,90			185-195 1)	22,80	2,50-4,50	6 400-12 000	7,00 od. 9,10 4)	=====
	VI c							270-280 1)	22,80	2,50-4,50	9 600-18 000	9,10 4)	=====
								195-200 1)	33,00-34,20 1)	2,50-4,50	9 600-18 000		
	VII								285	33,00-34,20 1)	2,50-4,50	14 500-27 000	9,10 4)

#### Fußnoten zur Klassifizierungstabelle

- 1) Die erste Zahl berücksichtigt die bestehende Situation, während die zweite sowohl zukünftige Entwicklungen als auch – in einigen Fällen – die bestehende Situation darstellt.
- 2) Berücksichtigt einen Sicherheitsabstand von etwa 30 cm zwischen dem höchsten Fixpunkt des Schiffes oder seiner Ladung und einer Brücke.
- 3) Berücksichtigt die Abmessungen von Fahrzeugen mit Eigenantrieb, die im Ro-Ro- und Containerverkehr erwartet werden. Die angegebenen Abmessungen sind annähernde Werte.
- 4) Für die Beförderung von Containern ausgelegt:  
5,25 m für Schiffe, die zwei Lagen Container befördern,  
7,00 m für Schiffe, die drei Lagen Container befördern,  
9,10 m für Schiffe, die vier Lagen Container befördern.  
50 % der Container können leer sein, sonst Ballastierung erforderlich.
- 5) Einige vorhandene Wasserstraßen können aufgrund der größten zulässigen Länge von Schiffen und Verbänden der Klasse IV zugeordnet werden, obwohl die größte Breite 11,40 m und der größte Tiefgang 4,00 m beträgt.
- 6) Schiffe, die im Gebiet der Oder und auf den Wasserstraßen zwischen Oder und Elbe eingesetzt werden.
- 7) Der Tiefgangswert für eine bestimmte Binnenwasserstraße ist entsprechend den örtlichen Bedingungen festzulegen.
- 8) Auf einigen Abschnitten von Wasserstraßen der Klasse VII können auch Schubverbände eingesetzt werden, die aus einer größeren Anzahl von Leichtern bestehen. In diesem Fall können die horizontalen Abmessungen die in der Tabelle angegebenen Werte übersteigen.

Anhang 1: Klassifizierung der Binnenwasserstraßen

Klassifizierte Binnenwasserstraßen des Bundes

Quelle abgerufen am 01.08.2016 unter:

[http://www.wsv.de/service/karten\\_geoinformationen/bundeseinheitlich/pdf/w161k\\_A3.pdf](http://www.wsv.de/service/karten_geoinformationen/bundeseinheitlich/pdf/w161k_A3.pdf)

BUNDESWASSERSTRASSEN  
- Klassifizierung der Binnenwasserstraßen des Bundes



Klassifizierte Binnenwasserstraßen

Graphisches Symbol auf der Karte	Klasse der Binnen- wasser- straße	MOTORSCHIFFE UND SCHLEPPKÄHNE					SCHUBVERBÄNDE					Brücken- durchfahrts- höhe
		Bezeichnung	Länge L (m)	Breite B (m)	Tiefgang d (m)	Tonnage T (t)	Art des Schubverbandes	Länge L (m)	Breite B (m)	Tiefgang d (m)	Tonnage T (t)	
I	I	Perle der Elbe	38,5	5,05	1,8-2,2	250-400						4,0
		Große Elbe	41	4,7	1,4	180						3,0
		Kirchhain	50-55	6,8	2,5	400-650						4,0-5,0
II	II	BM-500	57	7,5-9,0	1,8	500-630						3,0
		Große Elbe	67-80	8,2	2,5	650-1000						4,0-5,0
		Östlich der Elbe	67-70	8,2-9,0	1,6-2,0	470-700		118-132	8,2-9,0	1,6-2,0	1000-1200	4,0
III	III	Johann Volker	80-85	9,5	2,5	1000-1500		85	9,5	2,5-2,8	1250-1450	5,25 od. 7,0
		Große Rheinschiffe	95-110	11,4	2,5-2,8	1500-3000		95-110	11,4	2,5-4,5	1600-3000	5,25 od. 7,00 od. 9,1
								172-185	11,4	2,5-4,5	3200-6000	
IV	IV							95-110	22,8	2,5-4,5	3200-6000	7,0 od. 9,1
			140	15	3,9			185-195	22,8	2,5-4,5	6400-12000	
								270-280	22,8	2,5-4,5	9600-18000	9,1

nicht klassifizierte BinWaStr      keine BinWaStr

Bundeswasserstraßen, die eine Länge von unter 5 km aufweisen, sind maßstabsbedingt teilweise nicht dargestellt.

Kartographie: Fachstelle für Geoinformationen Süd, Regensburg



## Anhang 2: Grundgleichungen der Hydrodynamik

In Kapitel 2.2 wurden bereits die Grundlagen der hydrodynamisch-numerischen Modellierung von der Modellbildung, der Modellanwendung, der allgemeinen Grundgleichungen sowie der Modellgüte bzw. Fehlerquellen kompakt erläutert. Weitere Informationen zur Herleitung der hydrodynamischen Grundgleichungen und deren Vereinfachungen, Diskretisierung sowie den erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen werden in dem folgenden Anhang (siehe Inhaltsverzeichnis des Anhangs 2) beschrieben.

<b>2</b>	<b>Anhang 2: Grundgleichungen der Hydrodynamik.....</b>	<b>XVII</b>
2.1	Dreidimensionale Strömungsgleichungen.....	XVII
2.1.1	Herleitung der Kontinuitätsgleichung.....	XVIII
2.1.2	Herleitung der Impulsgleichungen.....	XIX
2.1.3	Berücksichtigung der Turbulenz.....	XXII
2.1.4	Dreidimensionale Flachwassergleichungen.....	XXV
2.1.5	Zweidimensionale tiefengemittelte Flachwassergleichungen.....	XXV
2.1.6	Eindimensionale Strömungsgleichungen.....	XXVII
2.2	Diskretisierung der Differentialgleichungen.....	XXXI
2.2.1	Zeitliche Diskretisierung.....	XXXI
2.2.2	Räumliche Diskretisierung.....	XXXIII
2.3	Anfangs- und Randbedingungen.....	XXXVI

Die folgenden Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf die übersichtlichen und umfangreichen Herleitungen der Grundgleichungen und ausführlichen Darstellungen von *Ferziger, Peric, 1996 [30]* bzw. *2008 [31]*, *Malcherek, 2001 [59]* bzw. *2002 [60]*, *Musall, 2011 [62]* und *Forkel, 2004 [32]* oder auf Grundlagenbücher der Strömungsmechanik (*Durst, 2006 [27]* oder *Lecheler, 2011 [56]*) bzw. der Hydrodynamik (*Martin, 2011 [61]*).

### 2.1 Dreidimensionale Strömungsgleichungen

Unter einer Strömung versteht man die Bewegung eines Fluides, verursacht durch die Einwirkung äußerer Kräfte. Die an einem Fluid angreifenden Kräfte können in Oberflächen- (Wind-, Druck- und Scherkräfte) und Volumenkräfte (Kraft durch Gravitation und Rotation) unterteilt werden. Die Differentialgleichungen zur räumlich dreidimensionalen und zeitabhängigen Beschreibung reibungsbehafteter Strömungen setzen sich aus einer Kontinuitätsgleichung und einer Bewegungsgleichung in die jeweilige Raumrichtung zusammen. Die Formulierung der Erhaltungssätze für den Massen- und Impulsstrom erfolgt exemplarisch an einem infinitesimal kleinen durchströmten Raumelement der Ausdehnung  $\Delta x \Delta y \Delta z$  (Kontrollvolumenelement) in einem dreidimensionalen,

ortsfesten, kartesischen Koordinatensystem (siehe Abbildung A2-1, Abbildung A2-2 und Abbildung A2-3 des Anhangs 2).

### 2.1.1 Herleitung der Kontinuitätsgleichung

Betrachtet man exemplarisch einen Massenfluss mit der Geschwindigkeit  $u$  in  $x$ -Richtung durch die Kontrollfläche (siehe Abbildung A2-1), so ergibt sich in einem Zeitschritt  $\Delta t$  das eingeflossene Volumen  $V$  zu  $\Delta x \Delta y \Delta z$ . Die eingetragene Masse  $m = \rho \cdot V$  pro Zeit  $\Delta t$  beträgt somit in der  $x$ -Richtung:

$$\frac{\rho \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \text{ bzw. mit der Geschwindigkeit } u = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ in } x\text{-Richtung ergibt sich } \rho u \Delta y \Delta z$$

Der ausströmende Massenfluss ergibt sich exemplarisch aus dem einströmenden Massenfluss und dessen mögliche Änderung in  $x$ -Richtung unter Berücksichtigung einer möglichen Geschwindigkeitsänderung beim Durchströmen des Kontrollvolumenelements zu:

$$\left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z$$

Die Abbildung A2-1 zeigt exemplarisch die Massenflüsse eines Kontrollvolumenelements für die Formulierung der allgemeinen Kontinuitätsgleichung. Die Dichte des Fluides ist in der Abbildung mit  $\rho$ , die Ansammlungsrate mit  $\partial m / \partial t$  gekennzeichnet und  $u, v, w$  sind die Geschwindigkeitsvektoren in der  $x$ -,  $y$ - oder  $z$ -Achse der jeweiligen Strömungsrichtung.

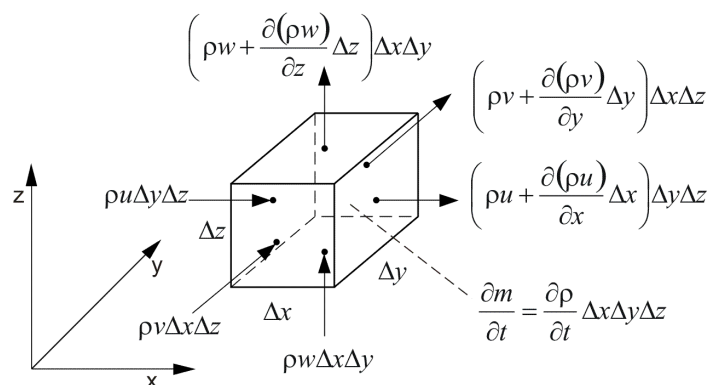


Abbildung A2-1: Herleitung der allgemeinen Kontinuitätsgleichung anhand der Betrachtung der Massenflüsse eines Kontrollvolumenelements in  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Richtung

Auf der Grundlage der Erhaltungssätze muss das einströmende Wasservolumen gleich dem ausströmenden Wasservolumen sein ( $\partial V / \partial t = 0$ ). Mit der Annahme konstanter Dichte ( $\rho = \text{const.}$ ) kann somit weder Masse verlorengehen, noch entstehen. Aus der Betrachtung der Massenflüsse ( $\partial m / \partial t = 0$ ) an einem dreidimensionalen Kontrollvolumenelement (in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung) und Division durch das Kontrollvolumen folgt für stationäre Strömungen die Kontinuitätsgleichung für ein infinitesimal kleines Raumelement in Differentialform in kartesischen Koordinaten zu:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad [\text{A2-1}]$$

$u, v, w$  Geschwindigkeit in  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Richtung [m/s]

$x, y, z$  Richtungskomponente in der jeweiligen Strömungsrichtung [m]

Oder als Kurzform in Indexschreibweise:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad [\text{A2-2}]$$

$u_j$  Geschwindigkeit in Richtung der Koordinate  $x, y$  und  $z$  [m/s]

$x_j$  Richtungskomponente der Strömung [m]

### 2.1.2 Herleitung der Impulsgleichungen

Ein Impuls ist in der newtonschen Mechanik als Masse  $m$  mal Geschwindigkeit  $u$  definiert. Der übertragene Impuls pro Zeit entspricht in Summe der Kraft  $\vec{F}$ . Die zeitliche Änderung des Impulses  $\partial(m\vec{u})/\partial t$  in einer Richtung ist gleich der Summe der extern angreifenden Kräfte  $\sum \vec{F}$  (Volumenkräfte und Oberflächenkräfte) auf das Kontrollvolumenelement in dieser Richtung. Die Erhaltungssätze für den Impulsstrom  $\partial(m\vec{u})/\partial t = \sum \vec{F}$  führen somit auf die Navier-Stokes-Gleichungen für die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung.

Zunächst erfolgt die Herleitung der Beschleunigungskräfte auf das Kontrollvolumenelement in einem dreidimensionalen, ortsfesten, kartesischen Koordinatensystem. Hier exemplarisch in Differentialform nur für die  $x$ -Richtung dargestellt (siehe Abbildung A2-2). Ähnlich wie bei der Herleitung der Kontinuitätsgleichung (siehe Abbildung A2-1) sind hier alle Terme mit der Geschwindigkeit  $u$  in  $x$ -Richtung multipliziert.

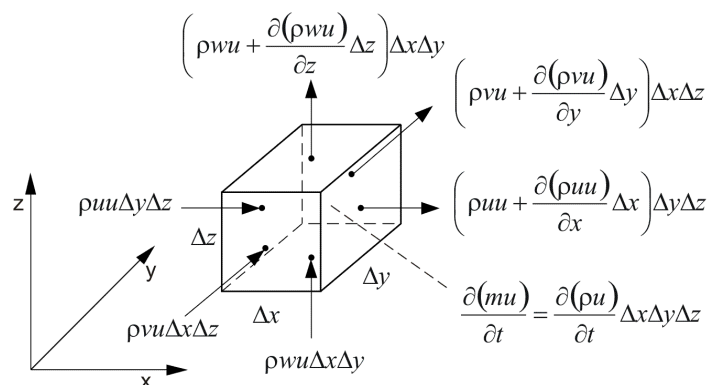


Abbildung A2-2: Herleitung der Impulsgleichung anhand der Betrachtung am dreidimensionalen Kontrollvolumenelement in  $x$ -Richtung

Die lokale Beschleunigung ist die Änderung der Geschwindigkeit mit der Zeit an einem festen Ort und ergibt sich zu:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Die konvektive Beschleunigung ist die Änderung der Geschwindigkeit mit dem Ort. Die konvektiven Beschleunigungsanteile lauten:

$$-\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z$$

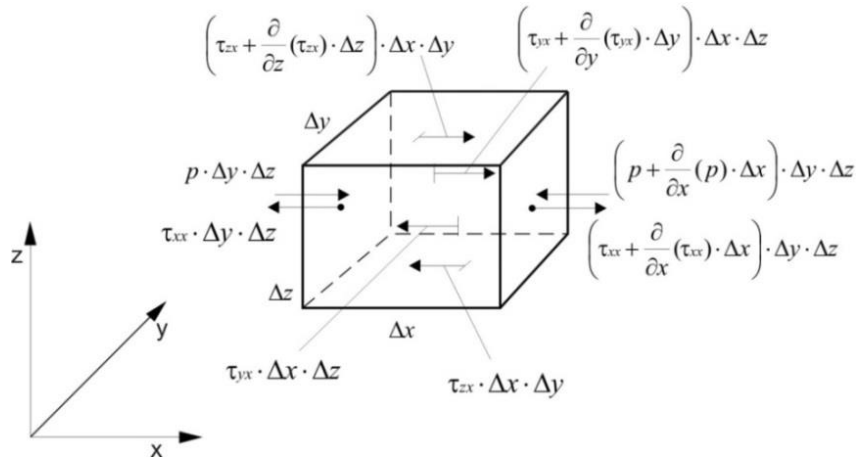


Abbildung A2-3: Oberflächenkräfte in  $x$ -Richtung am Kontrollvolumenelement (verändert nach *Lecheler, 2011 [56]*)

Die Abbildung A2-3 zeigt die angreifenden Oberflächenkräfte in  $x$ -Richtung am Kontrollvolumenelement.  $\tau_{xx}$  bezeichnet die Normalschubspannung in  $x$ -Richtung normal zur Fläche  $\Delta y \cdot \Delta z$  und  $\tau_{yx}$  bzw.  $\tau_{zx}$  beschreiben die Schubspannungen in  $x$ -Richtung entlang der Fläche  $\Delta x \cdot \Delta z$  bzw.  $\Delta x \cdot \Delta y$ . Der Druck wird als  $p$  in  $x$ -Richtung zur Fläche  $\Delta y \cdot \Delta z$  angegeben.

Nach dem Erhaltungssatz für den Impulsstrom entspricht die Summe der Beschleunigungskräfte (lokal und konvektiv) gleich der Summe, der am Kontrollvolumenelement angreifenden Volumen- und Oberflächenkräfte (z. B. Schwer-, Druck- und Reibungskräfte). Die durch Reibung entstehenden Spannungsterme verhalten sich unter Verwendung der kinematischen Viskosität  $\nu = \mu/\rho$  [ $m^2/s$ ] proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten. Um die Zahl der Unbekannten in den Gleichungen zu verringern, werden die reibungsbehafteten Normal- und Schubspannungen  $\tau_{ij}$  [ $N/m^2$ ] durch Geschwindigkeitsgradienten und der dynamischen Viskosität  $\mu$  [ $Ns/m^2$ ] nach *Lecheler, 2011 [56]* wie folgt angegeben:

$$\tau_{xx} = 2\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad \text{bzw.} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad [\text{A2-3}]$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad \text{bzw.} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \quad [\text{A2-4}]$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad \text{bzw.} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad [\text{A2-5}]$$

Nach Division der Kraftterme durch das Kontrollvolumen, Anwendung der Produktregel auf die Differenzenquotienten und Division durch die Dichte ( $\rho = \text{const.}$ ), lässt sich die Navier-Stokes-Gleichung in x-, y- bzw. z-Richtung wie folgt schreiben:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigungskräfte}} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Druckkräfte}} - \underbrace{\rho \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right)}_{\text{Reibungskräfte}} \right] + \underbrace{g_x}_{\text{Volumenkräfte}} \quad [\text{A2-6}]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial p}{\partial y} - \rho \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) \right] + g_y \quad [\text{A2-7}]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial p}{\partial z} - \rho \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] + g_z \quad [\text{A2-8}]$$

Die Kurzform der allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen in Indexschreibweise lautet:

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigungskräfte}} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_j}}_{\text{Druckkräfte}} - \underbrace{\rho \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)}_{\text{Reibungskräfte}} \right] + \underbrace{\frac{1}{\rho} f_i}_{\text{Volumenkräfte}} \quad [\text{A2-9}]$$

$u_i, u_j$  Geschwindigkeit in Richtung der Koordinate x, y und z [m/s]

$x_i, x_j$  Richtungskomponente der Strömung [m]

$\rho$  Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]

$p$  Hydrostatischer Druck [N/m<sup>2</sup>]

$\nu$  Kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

$g$  Erdbeschleunigung [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$f_i$  Volumenkräfte (z. B. Schwerkraft)

Die Unbekannten der Gleichungssysteme sind der dreidimensionale Strömungsvektor  $u_i$  und der Druck  $p$ . Die wirkenden Volumenkräfte z. B. die Schwerkraft werden durch  $f_i$  beschrieben.

Bei den Navier-Stokes-Gleichungen [A2-6] ff. handelt es sich um gekoppelte, nicht lineare, partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die im Allgemeinen nicht analytisch lösbar sind. Die Lösung der komplexen Strömungsgleichungen ist nur mittels numerischer Verfahren möglich (z. B. Finite Differenzen oder Finite Volumen Verfahren, Kapitel 2.2.2 des Anhangs 2). Durch Approximation werden die kontinuierlichen Differentialgleichungen in diskretisierte Gleichungen mit einer endlichen Anzahl an Stützstellen in Raum und Zeit überführt. Diese diskretisierten Gleichungen lassen sich an

jeder Stützstelle mit numerischen Verfahren für die relevanten abhängigen Variablen lösen. In den Gleichungen wird die natürlich vorkommende Turbulenz in Strömungen meist durch zusätzliche Terme beschrieben (Kapitel 2.1.3 des Anhangs 2).

Dreidimensionale Modellgleichungen haben gegenüber zwei- oder eindimensionalen Modellgleichungen einen erhöhten Informationsgehalt. Dreidimensionale Modelle geben alle räumlichen Zustandsgrößen eines Gebietes wieder. Allerdings erfordern sie äußerst detaillierte Eingangsdaten und sind durch die Rechenkapazität derzeit noch eingeschränkt.

### 2.1.3 Berücksichtigung der Turbulenz

Turbulente Strömungen sind charakterisiert durch dreidimensionale, außerordentlich instationäre Wirbelstrukturen unterschiedlicher Größe. Sie zeichnen sich durch unkontrolliert ablaufende Fluidbewegungen und starke Irregularitäten, d. h. durch stark ändernde Fluktuationen der Geschwindigkeit und des Druckes bei großen Reynoldszahlen, aus. Die großen Wirbelstrukturen haben die Größenordnung des Strömungsgebietes und zerfallen in immer kleinere Wirbelstrukturen (Wirbelkaskade). Die kleinsten Wirbelstrukturen besitzen einen äußerst kurzen Zeit- und Längensmaßstab. Am Ende der Wirbelkaskade wandeln sich die kleinsten Wirbel in Wärmeenergie (Dissipation) um. Eine umfassende Darstellung und eingehende Erläuterung in die Turbulenzmodellierung ist beispielsweise in den Werken von *Rodi, 2000 [72]*, *Durst, 2006 [27]* und *Hinze, 1975 [49]* enthalten.

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur numerischen Erfassung der Turbulenz. Das sind die Direkte Numerische Simulation (DNS), die Large Eddy Simulation (LES) und die statistische Turbulenzmodellierung (gemittelte Grundgleichung und Turbulenzmodell). *Martin, 2011 [61]* stellt die Möglichkeiten zur Berechnung turbulenter Strömungen übersichtlich dar (siehe Abbildung A2-4).



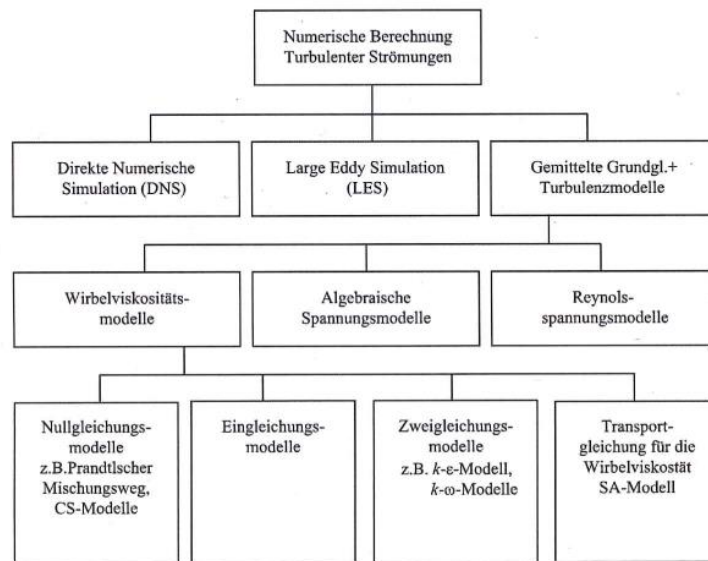


Abbildung A2-4: Möglichkeiten zur Berechnung turbulenter Strömungen (Martin, 2011 [61])

Um kleinste Wirbelstrukturen im Modellgebiet zu erfassen, bedarf dies einer sehr hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung (Diskretisierung) des Untersuchungsgebietes. Aufgrund der hohen Diskretisierung (im Millimeterbereich) und eingeschränkter Rechnerressourcen ist der Ansatz der Direkten Numerischen Simulation (DNS) der Turbulenz, bei der die Navier-Stokes-Gleichungen direkt gelöst werden, bislang nur für kleine Reynoldszahlen sowie kleine Modellgebiete praktikabel. Dieser Ansatz wird im Wesentlichen bei der Grundlagenforschung eingesetzt. Die Größe der kleinsten zu simulierenden Wirbel kann mittels der Kolmogorov-Länge  $\lambda$  [m] über die dimensionslose Reynoldszahl  $Re$  [-] abgeschätzt werden:

$$\lambda = \frac{h}{Re^{3/4}} \quad [A2-10]$$

$h$	Fließtiefe [m]
$Re$	Reynoldszahl mit $Re = \frac{u \cdot r_{hy}}{\nu} = \frac{u \cdot h}{\nu}$ [-]
$u$	Mittlere Geschwindigkeit in $x$ -Richtung [m/s]
$r_{hy}$	Hydraulischer Radius [m]
$\nu$	Kinematische Viskosität [m <sup>2</sup> /s]

Bei den meisten Fragestellungen ist eine hochaufgelöste dreidimensionale Modellierung der Strömung bis hin zu den kleinsten Wirbelstrukturen, wie es bei der Direkten Numerischen Simulation durchgeführt wird, meist nicht möglich oder zu zeit- und kostenaufwendig. Häufig reicht die Kenntnis der Mittelwerte der Strömungskenngrößen in der Praxis aus. Die mittlere Hauptströmung wird von unregelmäßigen Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen (Schwankungsgröße) überlagert. Bei der sogenannten statistischen Modellierung der Turbulenz wird die Geschwindigkeit  $u$  und der Druck  $p$  in einen gemittelten Anteil  $\bar{u}$  bzw.  $\bar{p}$  sowie eine turbulente Schwankungsgröße (Fluktuation)  $u'$  bzw.  $p'$  zerlegt:

$$u = \bar{u} + u' \quad p = \bar{p} + p' \quad [A2-11]$$

Ferziger, Peric, 1996 [30] und 2008 [31] stellen exemplarisch in Abbildung A2-5 für die Geschwindigkeit als Strömungskenngröße die Mittelung für eine stationäre und instationäre Strömung dar.

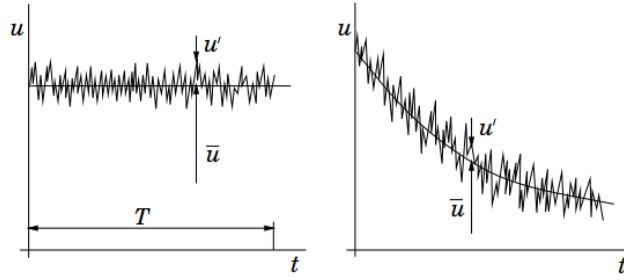


Abbildung A2-5: Zeitmittelung eines Strömungsparameters für eine statistisch stationäre Strömung (links) und Ensemblemittelung für eine instationäre Strömung (rechts) (Ferziger, Peric, 1996 [30] und 2008 [31])

Berücksichtigt man dieses Verhalten der Mittelung und der Schwankungsgröße in den Navier-Stokes-Gleichungen, so entstehen zusätzliche Terme turbulenter Spannungen, sogenannte Reynolds-Spannungsterme. Die resultierenden Gleichungen zur Beschreibung der mittleren auftretenden Strömungsverhältnisse bezeichnet man als statistisch gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen, Reynoldsgleichungen oder RANS- (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) Gleichungen. Die Kurzform der Reynoldsgleichungen in Indexschreibweise für die Massen- und Impulserhaltung ergeben sich zu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad [A2-12]$$

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigungskräfte}} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[ \underbrace{\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}}_{\text{Druckkräfte}} - \underbrace{\rho \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right)}_{\text{Reibungskräfte}} \right] + \underbrace{\frac{1}{\rho} f_i}_{\text{Volumenkräfte}} \quad [A2-13]$$

Die Spannungsterme berücksichtigen die turbulenten Schwankungen, die nicht von dem Modell selbst abgebildet werden. Durch die zusätzlichen Terme für die turbulenten Schwankungsgrößen kommt es zum sogenannten Schließungsproblem, d. h., dass im Gleichungssystem mehr Unbekannte existieren, als Anzahl Gleichungen vorhanden sind. Diese zusätzlichen Spannungsterme beschreiben den Impulsaustausch der Strömung durch die turbulenten Bewegungen und werden in der Praxis meist durch mehr oder weniger empirische Turbulenzmodelle (Wirbelviskositäts-, Algebraische Spannungs- oder Reynoldsspannungsmodelle) unterschiedlicher Komplexität beschrieben. Eine umfassende Beschreibung der Turbulenzmodelle ist in Zielke et al., 1999 [87], Malcherek, 2001 [59], Martin, 2011 [61] oder Musall, 2011 [62] dargestellt.

Bei der Large Eddy Simulation (LES) oder auch Grobstruktursimulation werden nur die großen Wirbelstrukturen direkt simuliert. Die Auswirkungen der kleineren Wirbel werden über zusätzliche Modelle unterschiedlicher Komplexität beschrieben. Der Ansatz zeigt gute Simulationsergebnisse für turbulente Strömungen, da die größten Energieverluste von den großen Wirbelstrukturen kommen. Die LES basiert auf einem grobmaschigeren Berechnungsnetz. Im Vergleich zur DNS ist der Berechnungsaufwand geringer, aber dennoch deutlich höher als bei der statistischen Turbulenzmodellierung.

### 2.1.4 Dreidimensionale Flachwassergleichungen

Die Modellierung der freien Wasseroberfläche in natürlichen Oberflächengewässern ist bei der dreidimensionalen Strömungssimulation eine besondere Herausforderung. Durch Vereinfachungen der dreidimensionalen Grundgleichungen zu den sogenannten dreidimensionalen Flachwassergleichungen werden vereinfachte Annahmen für die freie Wasserspiegellage getroffen. Die Flachwassergleichungen beruhen auf der Annahme, dass die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten im Vergleich zu den Geschwindigkeitskomponenten in Hauptfließrichtung bzw. über den Querschnitt vernachlässigbar sind ( $w \ll u, v$ ). Sie sind gültig für Gewässer mit einer im Verhältnis zur Tiefe großen Länge und Breite ( $z \ll x, y$ ). Durch Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung, d. h. der Druck nimmt linear mit der Wassertiefe zu, und Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz, werden die allgemeinen, dreidimensionalen Bewegungsgleichungen somit vereinfacht. Herleitungen dazu finden sich in *Zielke et al., 1999 [87]* und *Musall, 2011 [62]*. Die Impuls Gleichung in  $z$ -Richtung minimiert sich auf den hydrostatischen Druckansatz:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad [\text{A2-14}]$$

Der Druckterm lässt sich als Funktion der Wasserspiegellage  $z_w [m]$  in der Form ausdrücken:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \rho g \frac{\partial z_w}{\partial x_i} \quad [\text{A2-15}]$$

Damit wird der Druck als Unbekannte aus den Gleichungen eliminiert.

### 2.1.5 Zweidimensionale tiefengemittelte Flachwassergleichungen

Die vertikale Integration der dreidimensionalen Flachwassergleichungen unter den Annahmen einer Tiefenmittelung der Geschwindigkeit, einer hydrostatischen Druckverteilung und eines geringen Sohl- bzw. Wasserspiegellagengefälles, führt auf die zweidimensionalen tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Die Strömungsgleichungen sind für Modellgebiete anwendbar, deren Fließtiefe im Vergleich zur horizontalen Ausdehnung gering ist. Ähnlich wie bei den dreidimensionalen Flachwassergleichungen wird der Druck als unbekannte Variable aus den Differentialgleichungen als Funktion des Wasserstandes  $h$  ausgedrückt. Umfangreiche Ausführungen und Herleitungen dazu finden sich z. B. in *Zielke et al., 1999 [87]*, *Malcherek, 2001 [59]*, *Musall, 2011 [62]*.

Die zweidimensionale, tiefenintegrierte Kontinuitätsgleichung ergibt sich zu:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad [\text{A2-16}]$$

bzw. in Indexschreibweise lautet die Gleichung wie folgt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu_j}{\partial x_j} = 0 \quad [\text{A2-17}]$$

Die zweidimensionalen, tiefenintegrierten Impulsgleichungen ergeben sich zu:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial z_w}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) - \frac{1}{h} \cdot \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad [\text{A2-18}]$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigung}} = - \underbrace{g \cdot \frac{\partial z_w}{\partial y}}_{\text{Freie Oberfläche}} + \underbrace{\nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right)}_{\text{Diffusionsterme}} - \underbrace{\frac{1}{h} \cdot \frac{\tau_{by}}{\rho}}_{\text{Sohlschubspannung}} \quad [\text{A2-19}]$$

bzw. in Kurzform lautet die Gleichung in Indexschreibweise wie folgt:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \cdot \frac{\partial z_w}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{h} \cdot \frac{\tau_{bx_i}}{\rho} \quad [\text{A2-20}]$$

Die Ermittlung der Sohlschubspannungen  $\tau_{bi}$  [ $\text{N/m}^2$ ] basiert meist auf einem quadratischen Geschwindigkeitsgesetz:

$$\tau_{bi} = \rho c_f u_i |u| \quad [\text{A2-21}]$$

$c_f$       Reibungskoeffizient [-]

$|u|$       Betrag der tiefengemittelten Geschwindigkeit [ $\text{m/s}$ ]

Zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten  $c_f$  wird auf die in der eindimensionalen Gerinnehydraulik bewährten Fließformeln nach Chezy, Darcy-Weisbach, Manning oder Gaukler-Manning-Strickler (Chow, 1959 [22] und Jirka et al., 2005 [53]) und deren Widerstandsbeiwerte  $C$  [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ],  $n$  [ $\text{s/m}^{1/3}$ ],  $\lambda$  [-] bzw.  $k_{St}$  [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] verwiesen. In der Literatur existieren zahlreiche Tabellen mit Vorschlägen für die Wahl der Reibungskoeffizienten (Naudascher, 1987 [63] oder DVWK-Schrift 92 von Schröder et al., 1990 [74]). Die Umrechnung zwischen den Reibungskoeffizienten ist gegeben durch:

$$c_f = \frac{g}{C^2} = \frac{gn^2}{h^{-1/3}} = \frac{\lambda}{8} = \frac{g}{k_{St}^2 h^{1/3}} \quad [\text{A2-22}]$$

### 2.1.6 Eindimensionale Strömungsgleichungen

Großräumig betrachtete natürliche Fließgewässer weisen meist eine primär eindimensionale Strömungscharakteristik auf. Zur Simulation der Strömungsverhältnisse und Berechnung der geforderten Zielgrößen wird daher ein eindimensionales instationäres Strömungsmodell verwendet. Die eindimensionale Modellbildung beruht auf der vereinfachten Annahme, dass alle Geschwindigkeitskomponenten quer zur Hauptfließrichtung im Vergleich zur Geschwindigkeitskomponente in Hauptfließrichtung vernachlässigbar sind ( $v, w \ll u$ ). Vereinfacht ausgedrückt, bewegen sich die Fluidteilchen vorwiegend in Hauptfließrichtung, dazu vorhandene Querbewegungen werden nicht berücksichtigt. Die berechneten Strömungskenngrößen liegen über den Fließquerschnitt (Breite und Tiefe) gemittelt vor.

Die eindimensionalen Saint-Venant Gleichungen erhält man durch vertikale und laterale Integration (Tiefen- und Querschnittsmittelung) der allgemeinen dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen. Die folgenden Annahmen und die Herleitung der Saint-Venant Gleichungen berufen sich auf die Quellen *Jaeger, 1949 [52]*, *Cunge et al., 1980 [23]* und *Bollrich et al., 1989 [16]*.

Voraussetzungen und Annahmen der Saint-Venant Gleichungen:

- Das durchschnittliche Sohlgefälle  $I_0$  ist gering, sodass  $\sin \alpha = \tan \alpha$  und  $\cos \alpha = 1$ , wenn  $\alpha$  der Winkel zwischen der Gerinnesohle und der Horizontalen ist.
- Die Reibungs- und Turbulenzeffekte werden durch Widerstandsgesetze analog zur stationären Strömung berücksichtigt, d. h. die Fließformeln für den stationären Abfluss sind auch für den instationären Abfluss gültig.
- Die vertikalen Beschleunigungen können wegen der geringen Stromlinienkrümmung vernachlässigt werden. Der Wasserspiegel variiert allmählich über die Tiefe, sodass eine hydrostatische Druckverteilung angenommen werden kann. Die Dichte des Wassers ist konstant.
- Die Strömung ist eindimensional. Daher ist die Fließgeschwindigkeit an allen Stellen im Fließquerschnitt gleich groß und der Wasserspiegel innerhalb eines Querprofils horizontal.
- Die Gerinnesohle ist mit der Zeit unveränderlich, d. h.  $\partial z / \partial t = 0$ .
- Die längenmäßige Ausdehnung in Fließrichtung ist um ein Vielfaches größer als die Breite  $B$  und die Wassertiefe  $h$  des Gerinnes ( $z \ll y < x$ ).
- Die Fließquerschnitte sind schwach gekrümmt und verändern sich nur allmählich.

Betrachtet wird ein Gerinneabschnitt der Länge  $\Delta x$ , der Breite  $B$ , der Wassertiefe  $h$  und des Durchflusses  $Q$  zum Zeitpunkt  $t$  und  $t + \Delta t$  (siehe Abbildung A2-6). Bei instationären Strömungen ändert sich die Wassertiefe  $h$  über das Zeitintervall  $\Delta t$  um den Wert  $\partial h / \partial t$ . Die Volumenänderung über die Zeit beträgt demnach  $B \cdot (\partial h / \partial t) \Delta t \cdot \Delta x = (\partial A / \partial t) \Delta t \cdot \Delta x$ . Da es sich bei Wasser um ein inkompressibles Fluid handelt, entspricht die Volumenänderung gleich der Durchflussänderung.

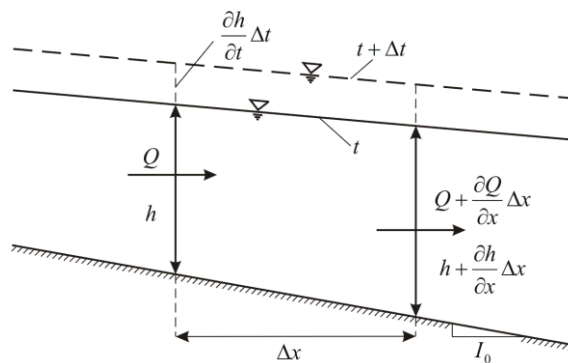


Abbildung A2-6: Kontinuität für den instationären Fall und inkompressible Fluide

Daraus folgt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \cdot \Delta t + B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t \cdot \Delta x = 0 \quad [\text{A2-23}]$$

Mit  $\partial A = B \cdot \partial h$  ergibt sich die Kontinuitätsgleichung nach Saint-Venant für den instationären Fall:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{oder} \quad \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad [\text{A2-24}]$$

- $B$       Breite des Gerinnes [m]  
 $h$       Wassertiefe [m]  
 $A$       Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]  
 $Q$       Mittlerer Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]

Um die Impulsgleichung nach Saint-Venant aufzustellen, wird ein Kontrollvolumen der Länge  $\Delta x$  und Breite  $B$  betrachtet (siehe Abbildung A2-7). Für die Anwendung des Impulssatzes müssen alle am Kontrollvolumen angreifenden Kräfte in die Gleichung einbezogen werden.

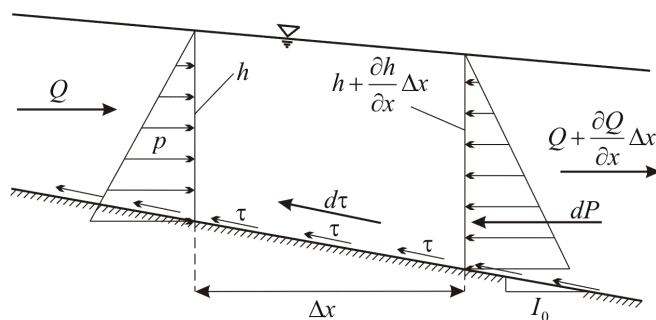


Abbildung A2-7: Kontrollvolumen mit den angreifenden Kräften für die Anwendung des Impulssatzes

Ausgegangen wird vom dynamischen Grundgesetz:

$$F = m \cdot a \quad [\text{A2-25}]$$



$F$	<i>Kraft [N]</i>
$m$	<i>Masse [kg]</i>
$a$	<i>Beschleunigung [m/s<sup>2</sup>]</i>

Die Masse  $m$  des Volumenelements ergibt sich als:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot \Delta x \quad [\text{A2-26}]$$

$\rho$	<i>Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]</i>
$V$	<i>Volumen [m<sup>3</sup>]</i>
$A$	<i>Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]</i>

Aus der Annahme, die horizontale Komponente der Beschleunigung in Hauptströmungsrichtung sei ungefähr die Beschleunigung selbst, folgt:

$$a = \underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x}}_{\text{lokale und konvektive Beschleunigung}} \quad [\text{A2-27}]$$

Der Impulsfluss durch die Kontrolloberfläche beträgt somit:

$$m \cdot a = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad [\text{A2-28}]$$

Die resultierende Druckkraft  $dP$ , die am Volumenelement angreift, ergibt sich als:

$$dP = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x = -\gamma \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x = -\rho \cdot g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \quad [\text{A2-29}]$$

$dP$	<i>Resultierende Druckkraft [N]</i>
$\gamma = \rho \cdot g$	<i>Spezifisches Gewicht des Fluides [kg/(m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>)]</i>
$g$	<i>Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]</i>

Aus der Schubspannung  $\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_e$  und dem hydraulischen Radius  $r_{hy} = A/U$  folgt für die resultierende Kraft  $d\tau$  der Wandreibung unter der Annahme, das Reibungsgesetz der stationären Strömungen gelte auch für nicht-stationäre Strömungen:

$$d\tau = -\tau \cdot U \cdot \Delta x = -\rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_e \cdot \frac{A}{r_{hy}} \cdot \Delta x = -\rho \cdot g \cdot I_e \cdot A \cdot \Delta x \quad [\text{A2-30}]$$

$d\tau$	<i>Resultierende Reibungskraft [N]</i>
$\tau$	<i>Schubspannung [N/m<sup>2</sup>]</i>
$U$	<i>Benetzter Umfang [m]</i>
$I_e$	<i>Energieliniengefälle [-]</i>

Die aus der Sohlschubspannung resultierenden äußeren Kräfte werden durch die Eigenschaften der bodennahen Strömungsgrenzschicht bestimmt. Die Vielfältigkeit der Rauheitselemente spiegelt die Komplexität des Fließbereiches wieder und ist in einem Modell nicht auflösbar. Deshalb wird die Sohlschubspannung durch einen weiteren parametrisierten Ansatz beschrieben. Der darin enthaltene Rauheitsbeiwert ist die wesentliche Kalibrierungsgröße für Flussgebietsmodelle. Für die Berechnung von Wasserstand bzw. Abfluss in offenen Gerinnen existieren zahlreiche Fließgesetze mit deren Hilfe das Gefälle berechnet werden kann. Exemplarisch wird hier auf das Fließgesetz nach Gauckler-Manning-Strickler verwiesen, da dieses von dem eindimensionalen Berechnungsprogramm *Cascade* (Bleninger et al., 2006 [10]; *Formelsammlung zu Cascade*, 2000 [20]) verwendet wird. Löst man die Gleichung  $u = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_e^{1/2}$  nach  $I_e$  auf und setzt  $I_e = \frac{u^2}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}}$  in die obige Reibungskraftgleichung ein, ergibt sich die resultierende Reibungskraft  $d\tau$  zu:

$$d\tau = -\rho \cdot g \cdot \frac{u^2}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} \cdot A \cdot \Delta x \quad [A2-31]$$

Aus dem Impulssatz folgt für die Kraft  $F$ :

$$F = dP + d\tau = -\rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} + I_e \right) = -\rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u^2}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} \right) \quad [A2-32]$$

Das Einsetzen der Gleichung für die Kraft und der Gleichung für den Impulsfluss in die Ausgangsgleichung  $F = m \cdot a$  führt zu folgender Bewegungsgleichung:

$$-\rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u^2}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} \right) = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot \frac{u^2}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} = 0 \quad [A2-33]$$

Als Ergebnis erhält man über den Profilquerschnitt gemittelte Wasserstände sowie lateral und tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten. Datenhandhabung, Modellerstellung und Kalibrierung eines eindimensionalen Modells sind auch bei der Untersuchung großer Flussabschnitte effizient. Um Veränderungen quer zur Hauptfließrichtung erfassen zu können, sind 1D-HN-Modelle mit gegliederten Querschnitten (Hauptbett, Vorländer, Uferzonen, Verzweigungen) entwickelt worden. Komplexe Fließquerschnitte werden anhand ihrer unterschiedlichen Eigenschaften (z. B. Rauheiten, abflusswirksame Bereiche) in verschiedene Segmente gegliedert. Man differenziert z. B. zwischen Fließgeschwindigkeiten auf den Vorländern und im Hauptgerinne. Grundlage dafür ist eine Koppelung zwischen Wasserspiegel- und Energielinienbilanz an jeweils benachbarten Querschnitten. Über simultane Lösungsmethoden können zudem auch verzweigte bzw. vernetzte Systeme auf Basis eindimensionaler Verfahren modelliert werden.

## 2.2 Diskretisierung der Differentialgleichungen

Die in dem vorherigen Kapitel dargelegten Grundgleichungen zur vollständigen Beschreibung der Strömung lassen sich nicht ohne weiteres bzw. nur für einfache Fälle und Randbedingungen analytisch lösen. Zur Lösung der komplexen Differentialgleichungen werden numerische Verfahren (siehe Abbildung 2-12) eingesetzt. Die Diskretisierung beschreibt nicht nur die zeitliche und räumliche Aufteilung der partiellen Differentialgleichungen, sondern auch die Überführung dieser Differentialgleichungen in lösbare algebraische Gleichungen für bestimmte Zeit- und Raumpunkte. An den Stützstellen werden, unter Anwendung von Gleichungslösern, sogenannte Näherungslösungen für die Unbekannten ermittelt. Im Ergebnis erhält man an den Berechnungstützstellen die orts- und zeitabhängigen hydraulischen Parameter.

### 2.2.1 Zeitliche Diskretisierung

Bei der zeitlichen Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen existieren unterschiedliche numerische Verfahren z. B. Einschrittverfahren, Mehrschrittverfahren, iterative Verfahren. Hierbei wird auf die Literatur von Zielke *et al.*, 1999 [87] verwiesen. Die Verfahren basieren auf dem als Finite Differenzen Methode bezeichneten Prinzip, welches die Differentialgleichungen durch Differenzenquotienten annähert. Exemplarisch wird das Zeitschrittverfahren vorgestellt an einer beliebigen zeitabhängigen Differentialgleichung der Form:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u) \quad [\text{A2-34}]$$

Zur Lösung wird die Zeit in eine endliche Anzahl  $n$  von Zeitschritten der Länge  $\Delta t$  zerlegt, wobei die Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt  $t_0$  und der Zeitschritt  $n$  bekannt sind. Somit können die gesuchten Kenngrößen zum Zeitpunkt  $t_n$  wie folgt berechnet werden:

$$t_n = t_0 + n \cdot \Delta t \quad [\text{A2-35}]$$

Bei dem sogenannten Einschrittverfahren wird die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit angenähert durch:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \cong \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} \quad [\text{A2-36}]$$

Die Variable  $u$  der obigen beliebigen Differentialgleichung  $f(u)$  kann als gewichtete Linearkombination der bekannten Größe  $u_n$  und der gesuchten Lösung  $u_{n+1}$  geschrieben werden. Der dimensionslose Wichtungsfaktor  $\theta$  [-] wird als Crank-Nicolson-Faktor bezeichnet, für welchen gilt  $0 \leq \theta \leq 1$ :

$$\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = \theta \cdot f(u_{n+1}) + (1 - \theta) \cdot f(u_n) \quad [\text{A2-37}]$$

Für  $\theta = 0$  ergibt sich das explizite Euler-Verfahren, bei dem die Unbekannten zum Zeitschritt  $t_{n+1}$  ausschließlich unter Verwendung bekannter Kenngrößen zum Zeitschritt  $t_n$  ermittelt werden (siehe Abbildung A2-8):

$$\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = f(u_n) \quad [\text{A2-38}]$$

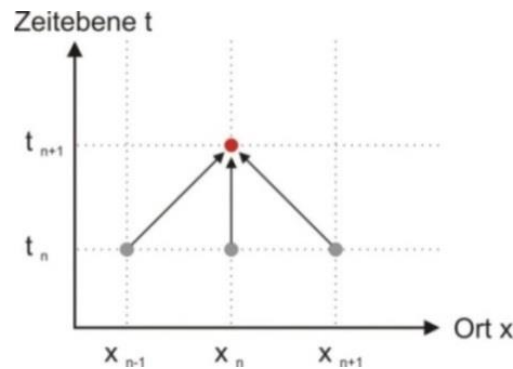


Abbildung A2-8: Lösungsbedingungen für explizite Diskretisierungsverfahren (verändert nach LUBW, 2003 [57])

Abbildung A2-8 zeigt die Lösungsbedingungen für explizite Diskretisierungsverfahren. Der Berechnungsaufwand pro Zeitschritt ist verhältnismäßig gering. Die gesuchten Parameter werden für jeden Knoten getrennt berechnet. Nachteilig sind die auftretenden numerischen Instabilitäten bei zu großer Zeitschrittlänge  $\Delta t$ . Deshalb muss bei expliziten Verfahren bei der Wahl der Zeitschrittlänge  $\Delta t$  das sogenannte Courant-Kriterium  $Cr \leq 1$  [-] eingehalten werden. Das Kriterium begrenzt den maximal möglichen Zeitschritt und besagt, dass sich innerhalb eines Zeitschrittes  $\Delta t$  ein Fluidteilchen mit der Geschwindigkeit  $u$  maximal um die Gitterweite  $\Delta x$  von einem Gitterpunkt zum nächsten bewegt:

$$Cr = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad [\text{A2-39}]$$

Für  $\theta = 1$  ergibt sich das implizite Euler-Verfahren, bei dem die Unbekannten zum Zeitschritt  $t_{n+1}$  sowohl unter Verwendung bekannter Kenngrößen zum Zeitschritt  $t_n$  als auch unter Verwendung der Lösungen der Nachbarknoten zum Zeitschritt  $t_{n+1}$  ermittelt werden (siehe Abbildung A2-9):

$$\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = f(u_{n+1}) \quad [\text{A2-40}]$$

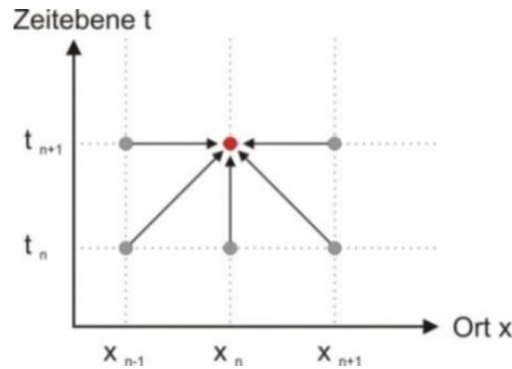


Abbildung A2-9: Lösungsbedingungen für implizite Diskretisierungsverfahren (verändert nach LUBW, 2003 [57])

Abbildung A2-9 zeigt die Lösungsbedingungen für implizite Diskretisierungsverfahren. Der Berechnungsaufwand ist bei impliziten Diskretisierungsverfahren größer als bei expliziten Verfahren. Allerdings läuft das implizite Verfahren gegenüber dem expliziten Verfahren bei der Wahl großer Zeitschritte  $\Delta t$  wesentlich stabiler. Es existieren auch semi-implizite Verfahren bei denen der Crank-Nicolson Faktor zwischen  $0 < \theta < 1$  gewählt wird.

## 2.2.2 Räumliche Diskretisierung

Bei der räumlichen Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen existieren mehrere numerische Methoden mit unterschiedlichen Ansätzen wie z. B. Finite Differenzen Methode (FDM), Finite Volumen Methode (FVM) oder Finite Elemente Methode (FEM). Einen guten Einblick in gängige Methoden und umfassende Darstellungen geben *Forkel, 2004 [32]*, *Ferziger, Peric, 2008 [31]* und *Martin, 2011 [61]*.

### 2.2.2.1 Finite Differenzen Methode

Bei der Finite Differenzen Methode (FDM) werden die partiellen Ortsableitungen in den Differentialgleichungen durch Differenzenquotienten unter Verwendung von Taylorreihenentwicklung für eine beliebige Funktion angenähert. Zur Approximation der ersten Ableitungen werden Vorwärts-, Rückwärts-, Zentral- oder gewichtete Differenzen eingesetzt. Abbildung A2-10 zeigt eine schematische Darstellung der Differenzen zur Approximation der ersten Ableitung. Exemplarisch ergibt sich für die Bestimmung des Differenzenquotienten erster Ordnung (erste Ableitung) der Strömungskenngröße  $u$  die Vorwärtsdifferenz zu:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad [\text{A2-41}]$$

die Rückwärtsdifferenz zu:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \quad [\text{A2-42}]$$

und die Zentraldifferenz zu:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad [\text{A2-43}]$$

Der Differenzenquotient zweiter Ordnung (zweite Ableitung) lässt sich durch die Zentraldifferenz wie folgt ausdrücken:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{\Delta x^2} \quad [\text{A2-44}]$$

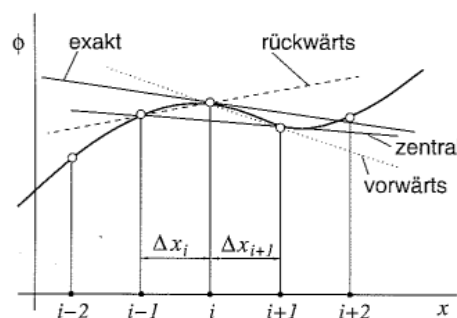


Abbildung A2-10: Schematische Darstellung der Vorwärts-, Rückwärts- und Zentraldifferenz zur Approximation der ersten Ableitung (Ferziger, Peric, 2008 [31])

In jedem Gitterpunkt wird die Differentialgleichung durch eine algebraische Gleichung approximiert. Die Finite Differenzen Methode eignet sich gut für gleichmäßige, orthogonale Berechnungsgitter (siehe Abbildung A2-11). Vorteile sind die einfache Programmierung und der geringe Berechnungsaufwand. Nachteilig ist der größere Aufwand bei einer lokalen Netzverfeinerung oder gar der Anwendung des Verfahrens auf nicht äquidistante oder gekrümmte Berechnungsgitter.

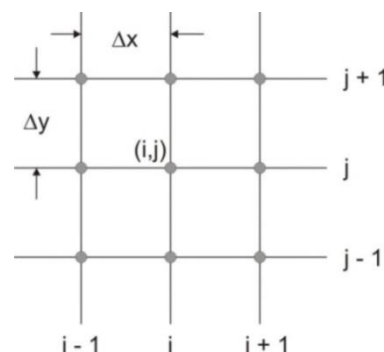


Abbildung A2-11: Berechnungsgitter für die 2D Finite Differenzen Methode (verändert nach Zielke et al., 1999 [87])

Die unterschiedlichen Verfahren bei der zeitlichen Diskretisierung können mit der räumlichen Diskretisierung kombiniert werden. Diese Möglichkeiten der Diskretisierung in Ergänzung mit Wichtungsfaktoren führen auf zahlreiche Finite Differenzen Schemata nach z. B. Leap Frog, Crank-



Nicolson oder Preissmann. Eine gute Übersicht möglicher Finite Differenzen Schemata befindet sich z. B. in Zielke *et al.*, 1999 [87].

### 2.2.2.2 Finite Volumen Methode

Die Finite Volumen Methode (FVM) basiert auf einer Bilanzierung der Flüsse über die Ränder benachbarter Kontrollvolumina. Für das Kontrollvolumenelement um eine Stützstelle wird eine algebraische Bilanzgleichung aufgestellt. Die Diskretisierung des Modellgebietes erfolgt meist durch gleichmäßig strukturierte Berechnungsgitter (siehe Abbildung A2-12), aber auch orthogonal strukturierte Gitterstrukturen (siehe Abbildung A2-13) sind möglich. Voraussetzung ist jedoch, dass sich die Verbindungslinie benachbarter Polygonzentren und die gemeinsame Polygonkante mittig und orthogonal schneiden (*Malcherek*, 2002 [60]). Das Modellgebiet wird dabei in sich nicht überlappende Kontrollvolumina unterteilt. Die Erhaltungsgleichungen werden auf jedes Kontrollvolumen angewendet. Der Volumeninhalt ist von der eingesetzten Grundgleichung (z. B.  $\Delta x$  bei 1D,  $\Delta x \Delta y$  bei 2D oder  $\Delta x \Delta y \Delta z$  bei 3D) abhängig. Die Finite Volumen Methode ist massenerhaltend, d. h. ein Massenfluss, der ein bestimmtes Kontrollvolumenelement über den Rand verlässt, strömt in das benachbarte Element ein.

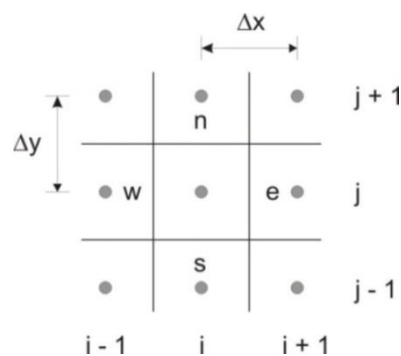


Abbildung A2-12: Äquidistant strukturierte 2D Finite Volumen Berechnungsgittergeometrie (verändert nach Zielke *et al.*, 1999 [87])

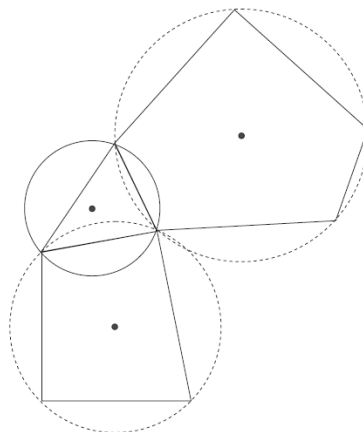


Abbildung A2-13: Orthogonal strukturierte 2D Finite Volumen Berechnungsgittergeometrie (*Malcherek*, 2002 [60])

### 2.2.2.3 Finite Elemente Methode

Bei der Finite Elemente Methode (FEM) werden die Differentialgleichungen in ihrer integralen Form gelöst, indem ihr gewichtetes Integral minimiert wird. D. h. die Gleichungen werden zuvor mit einer Gewichtungsfunktion multipliziert, bevor sie über das Lösungsgebiet integriert werden. Das Modellgebiet wird hierbei in eine endliche Anzahl sich nicht überschneidender, geometrischer Elemente aufgeteilt. An den Elementeckpunkten werden die Wichtungsfunktionen definiert. Die gesuchte Lösung innerhalb eines Elementes wird über eine endliche Polynomfunktion, eine Linearkombination unabhängiger Ansatzfunktionen, angenähert. Die unbekannten Koeffizienten werden so ermittelt, dass sich eine möglichst gute Näherungslösung ergibt. Bei der Methode der gewichteten Residuen z. B. werden die Elementintegrale der gewichteten Abweichungen zwischen der exakten Lösung und der Näherungslösung minimiert. Die unterschiedlichen Verfahren unterscheiden sich in den eingesetzten Ansatz- und Wichtungsfunktionen. Detaillierte und weiterführende Ausführungen können *Zielke et al., 1999 [87]*, *Forkel, 2004 [32]* oder *Martin, 2011 [61]* entnommen werden.

Der Rechenaufwand ist bei der Finiten Elemente Methode deutlich höher, als bei der Finiten Differenzen oder Finiten Volumen Methode. Jedoch kann durch Verwendung unstrukturierter Berechnungsgitter das Geländemodell optimal abgebildet werden. Nachteilig ist, dass die Massenerhaltung für das gesamte Modell jedoch nicht für das Element gewährleistet wird.

## 2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Für die Lösung der Differentialgleichungen sind Anfangs- und Randbedingungen erforderlich. Anfangsbedingungen geben die Verteilung der abhängigen Strömungskenngrößen (Geschwindigkeiten, Drücke bzw. Wasserspiegellagen) im Modellgebiet für jeden Gitterknoten zum Zeitschritt  $t_0$  vor. Die Randbedingungen geben die Verteilung der Kenngrößen an den Modellgrenzen über die Simulationsdauer für jeden zu berechnenden Zeitschritt an. Bei stationären Berechnungen sind keine Anfangsbedingungen erforderlich.

Bei der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zur Strömungssimulation sind im Wesentlichen die Dirichlet- und Neumann-Randbedingung von Bedeutung. Bei der Cauchy-Randbedingung handelt es sich um eine Linearkombination von Dirichlet- und Neumann-Randbedingungen.

Die Dirichlet-Randbedingung (Randbedingung 1. Art) wird in der Regel am Einströmrand vorgegeben. Sie gibt die unbekannten Fließgeschwindigkeiten direkt über die Angabe der Geschwindigkeiten, des Durchflusses oder des Druckes an den definierten Randzellen vor. Eine exakte Angabe der Geschwindigkeitsverteilung am Modellrand ist meist nicht bekannt. Bei der Wahl des oberstromigen Modellrandes muss deshalb darauf geachtet werden, dass der Modellrand weit genug vom eigentlichen Untersuchungsgebiet entfernt liegt, sodass sich eine möglichst realistische Verteilung der Fließgeschwindigkeiten durch die Berechnung selbst einstellen kann.

Die Neumann-Randbedingung (Randbedingung 2. Art) wird in der Regel am Auslaufquerschnitt vorgegeben. Sie gibt den randnormalen Gradienten (Ableitung in Randnormalenrichtung) der

unbekannten Fließgeschwindigkeiten an den definierten Randzellen meist durch die Angabe des Wasserstandes bzw. Druckes vor. Der unterstromige Modellrand sollte ebenfalls weit genug vom eigentlichen Untersuchungsgebiet entfernt und in einem Fließgewässerabschnitt mit einer möglichst gleichförmigen Strömung liegen.

Die seitliche Begrenzung des Modells sollte stets so breit gewählt werden, dass die voraussichtlich maximal simulierten Überflutungsflächen von dieser Begrenzung nicht eingeschränkt werden.



## Anhang 3: Inland ENC Objektliste

Die deutsche Bezeichnung der sechsstelligen, englischen Kürzel wurde in Anlehnung an den Inland ENC WMS (Web Map Service) der WSV gewählt.

Kürzel für die Objekte der Inland ENC		
*Bezeichnung in Anlehnung an den InlandENC WMS der WSV		
Englische Bezeichnung	Kürzel	Deutsche Bezeichnung*
anchorage area	achare	Ankerplatzbereich
anchor berth	achbrt	Ankerliegeplatz
administration area	admare	Verwaltungsbezirk
airport/airfield	airare	Flughafen
beacon, lateral	bcnlat	Leuchtfeuer, laterales
beacon water-way	bcnwtw	Bake/Schwimmstange
berth	berths	Liegeplatz
buoy, lateral	boylat	Tonne, laterale
buoy, special purpose/general	boyspp	Tonne, Sonstige/Allgemeine
buoy water-way	boywtw	Tonne
bridge area	brgare	Brueckenbereich
bridge	bridge	Bruecke
built-up area	buaare	Siedlungsbereich
building, single	buisgl	Einzelgebäude
bunker station	bunsta	Bunkeranlage
canal	canals	Kanal
canal bank	canbnk	Kanalufer
cable, overhead	cblohd	Kabel, Überwasserkabel
cable, submarine	cbbsub	Kabel/Seekabel
coastline	coalne	Uferlinie
communication area	comare	Kommunikationsbereich
conveyor	convyr	Foerderer
cranes	cranes	Kran
caution area	ctnare	Warnbereich
current, non-gravitational	curent	Stroemung, nicht gravitationsbedingt
dam	damcon	Wehr/Damm
daymark	daymar	Bake
depth area	depare	Tiefenbereich
depth contour	depcnt	Tiefenlinie
distance mark	dismar	Entfernungsmarke
exceptional navigation structure	excnst	Besondere Navigationsstruktur
fairway	fairwy	Fahrwasser/Fahrinne
ferry route	feryrt	Faehrweg
floating dock	flodoc	Schwimmdock
fence/wall	fncIne	Zaun/Mauer
fortified structure	forstc	Festung
free port area	frpare	Freihafengebiet
gate	gatcon	Schleusentor
harbour area (administrative)	hrbare	Hafenbereich
harbour basin	hrbsbn	Hafenbecken
harbour facility	hrbfac	Hafenanlage
hulk	hulkes	Hulk
lake	lakare	See
light	lights	Licht
lock basin part	lkbspt	Schleusenbecken
land area	Indare	Landflaeche
landmark	Indmrk	Landmarke
land region	Indrgn	Landregion

Kürzel für die Objekte der Inland ENC		
*Bezeichnung in Anlehnung an den InlandENC WMS der WSV		
Englische Bezeichnung	Kürzel	Deutsche Bezeichnung*
lock area	lokare	Schleusengebiet
lock basin	lokbsn	Schleusenbecken
coverage	m_covr	Datenabdeckung
marine farm/culture	marcul	Marine Farm/Kultur
mooring/warping facility	morfac	Ankerplatz/Trosse
notice mark	notmrk	Schifffahrtszeichen
<b>obstruction</b>	<b>obstrn</b>	<b>Schifffahrtschindernis</b>
oil barrier	oilbar	Oelsperre
pile	pilpnt	Stange
pipeline area	pipare	Pipeline
pipeline, overhead	pipohd	Ueberlandpipeline
pipeline, submarine/on land	pipsol	Pipeline unter Wasser/an Land
<b>pontoon</b>	<b>ponton</b>	<b>Ponton</b>
production/storage area	prdare	Produktions-/Lagerbereich
<b>pylon/bridge support</b>	<b>pylons</b>	<b>Pylon</b>
radar reflector	radrfl	Radarreflektor
radar station	radsta	Radarstation
railway	railwy	Eisenbahn
radio calling-in point	rdocal	Funkmeldestelle
refuse dump	refdmp	Schutthalde
<b>restricted area</b>	<b>resare</b>	<b>Sperrgebiet</b>
<b>river bank</b>	<b>rivbnk</b>	<b>Flussufer</b>
<b>river</b>	<b>rivers</b>	<b>Flusses</b>
road	roadwy	Strasse
sea area/named water area	seaare	Benannte Wasserflaeche
silo/tank	siltnk	Silo/Tank
signal station, traffic	sistat	Signalanlage, Verkehr
signal station, warning	sistaw	Signalanlage, Warnung
<b>shoreline construction</b>	<b>slcons</b>	<b>Uferbauten</b>
slope topline	slotop	Hangobergrenze
small craft facility	smcfac	Bootsanlage
terminal	termnl	Terminal
topmark	topmar	Toppzeichen
turning basin	trnbsn	Wendebecken
tunnel	tunnel	Tunnel
two-way route part	twrtpt	Verkehrsfluss
vegetation	vegatn	Vegetation
vehicle transfer	vehtrf	Fahrzeugtransfer
wreck	wrecks	Wrack
<b>waterway axis</b>	<b>wtwaxs</b>	<b>Wasserstrassenachse</b>
waterway gauge	wtwgag	Wasserstrassenmessgeraet
<b>waterway profile</b>	<b>wtwprf</b>	<b>Wasserstrassenprofil</b>



## Anhang 4: Güterverkehrsdichte 2000

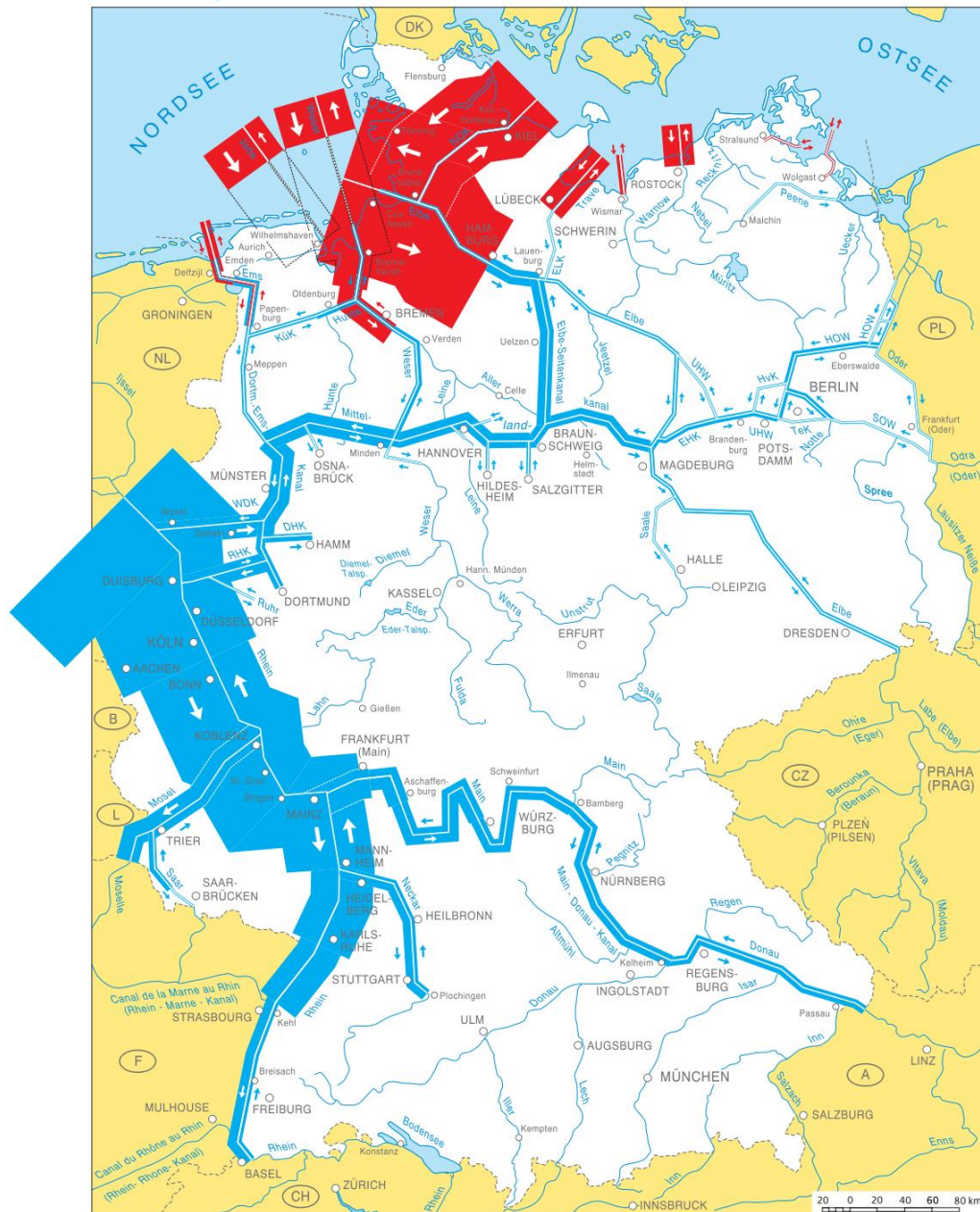
Güterverkehrsdichte 2000 der See- und Binnenschifffahrt auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen

Quelle abgerufen am 01.08.2016 unter:

[http://www.wsv.de/service/karten\\_geoinformationen/bundeseinheitlich/pdf/w172b\\_Gueterverkehrsdichte2000.pdf](http://www.wsv.de/service/karten_geoinformationen/bundeseinheitlich/pdf/w172b_Gueterverkehrsdichte2000.pdf)

### BUNDESWASSERSTRASSEN

- Güterverkehrsdichte der See- und Binnenschifffahrt 2000  
auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen



Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Januar 2014, Karte W 172 b  
Kartographie: Fachstelle für Geoinformationen Süd, Regensburg, zur Verfügung gestellt gemäß GeoNutzV  
Bundeswasserstraßen, die eine Länge von unter 5 km aufweisen, sind maßstabsbedingt teilweise nicht dargestellt.

Güterverkehrsdichte in Mio t (tkm / Länge der Wasserstraße in km)

bis 1 Mio t  
über 1 Mio t  
maßstäblich

Binnenschifffahrt  
Seeschifffahrt \*

Quelle: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

\*berechnet auf der Grundlage der Umschlagzahlen der Seehäfen - außer NOK



## Anhang 5: Driftwinkel-Radiusbeziehung am Niederrhein

In der Tabelle sind die Koeffizienten, Grade und Konstanten aus den Anpassungsfunktionen für die Driftwinkel-Radiusbeziehung für verschiedene Schiffstypen (TMS, üGMS, 2SV, 4SV und 6SV), Fahrtrichtung (Berg oder Tal) und Güte der Fahrt („gute, moderate und schwache Fahrt“) für das Untersuchungsgebiet des Niederrheins zusammenfassend dargestellt. In der Tabelle wurde das üGMS in der Bergfahrt ausgegraut, da nur eine Bergfahrt eines üGMS in dem Untersuchungsgebiet zur Verfügung stand.

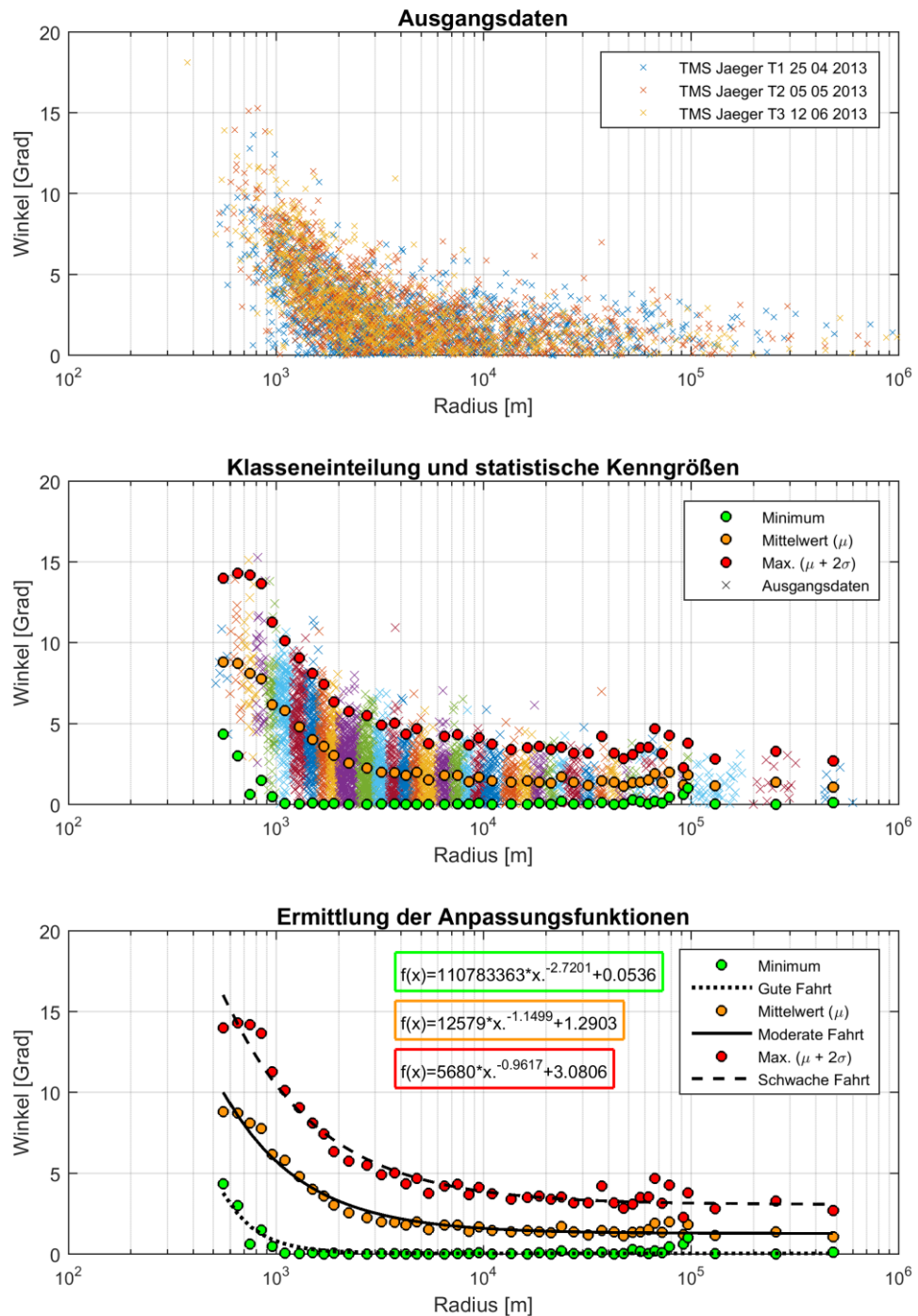
Schiffstyp	Fahrtrichtung (NR)	Funktion $f(x) = a * x^n + c$			Fahrt
		a	n	c	
TMS	Tal	5,6801E+03	-0,9617	3,0806	Schwache Fahrt
ueGMS	Tal	1,9563E+03	-0,7025	1,3473	Schwache Fahrt
2SV	Tal	6,4066E+03	-0,9060	3,5475	Schwache Fahrt
4SV	Tal	2,2450E+04	-1,1082	6,7964	Schwache Fahrt
6SV	Tal	8,0805E+02	-0,6054	4,3287	Schwache Fahrt
TMS	Berg	3,4555E+02	-0,7484	4,2751	Schwache Fahrt
ueGMS	Berg	4,0052E+04	-1,4472	2,8969	Schwache Fahrt
2SV	Berg	2,6748E+01	-0,2944	2,3083	Schwache Fahrt
4SV	Berg	1,1267E+03	-0,9406	5,9498	Schwache Fahrt
6SV	Berg	2,2557E+04	-1,5935	5,9934	Schwache Fahrt
TMS	Tal	1,2579E+04	-1,1499	1,2903	Moderate Fahrt
ueGMS	Tal	4,3730E+03	-0,9140	0,6278	Moderate Fahrt
2SV	Tal	9,2054E+03	-1,0251	1,3133	Moderate Fahrt
4SV	Tal	5,3136E+05	-1,6686	3,2811	Moderate Fahrt
6SV	Tal	4,0188E+03	-0,8822	1,8606	Moderate Fahrt
TMS	Berg	4,5096E+04	-1,6380	1,7769	Moderate Fahrt
ueGMS	Berg	1,8306E+05	-1,8071	1,1561	Moderate Fahrt
2SV	Berg	1,0257E+03	-1,0268	1,3144	Moderate Fahrt
4SV	Berg	3,7327E+03	-1,2786	2,4866	Moderate Fahrt
6SV	Berg	3,2198E+03	-1,3690	2,3436	Moderate Fahrt
TMS	Tal	1,1078E+08	-2,7201	0,0536	Gute Fahrt
ueGMS	Tal	1,5820E+06	-1,9634	0,0322	Gute Fahrt
2SV	Tal	1,2504E+07	-2,3586	0,0174	Gute Fahrt
4SV	Tal	9,8964E+08	-2,9567	0,2828	Gute Fahrt
6SV	Tal	2,9810E+07	-2,2432	0,0558	Gute Fahrt
TMS	Berg	6,2584E+08	-3,6424	0,1079	Gute Fahrt
ueGMS	Berg	2,1409E+09	-3,5116	0,0450	Gute Fahrt
2SV	Berg	5,1184E+03	-7,5184	0,0352	Gute Fahrt
4SV	Berg	-2,3764E+01	-0,7589	0,2035	Gute Fahrt
6SV	Berg	1,9467E+03	-7,4011	0,1518	Gute Fahrt

Die Abbildungen zu den Ausgangsdaten, der Klasseneinteilung sowie der Anpassungsfunktionen wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben, sind für die untersuchten Schiffstypen getrennt für Berg und Tal im Untersuchungsgebiet des Niederrheins im Folgenden dargestellt:

Schiffstyp: TMS

Fahrtrichtung: Tal

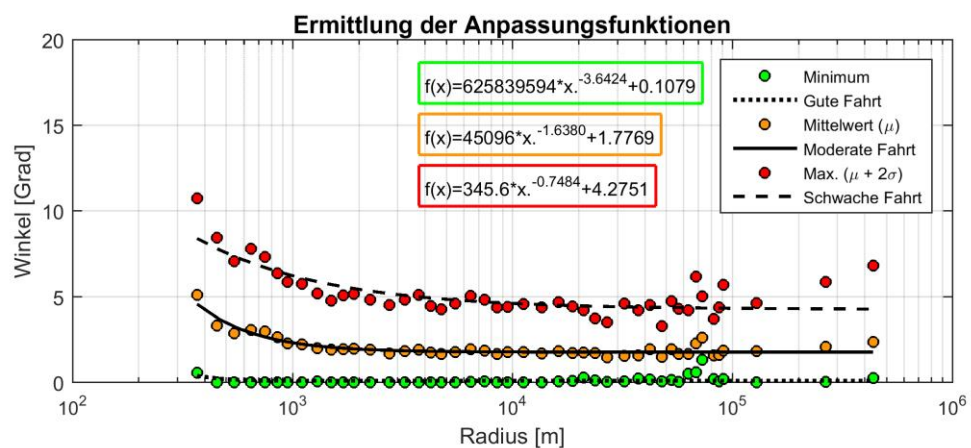
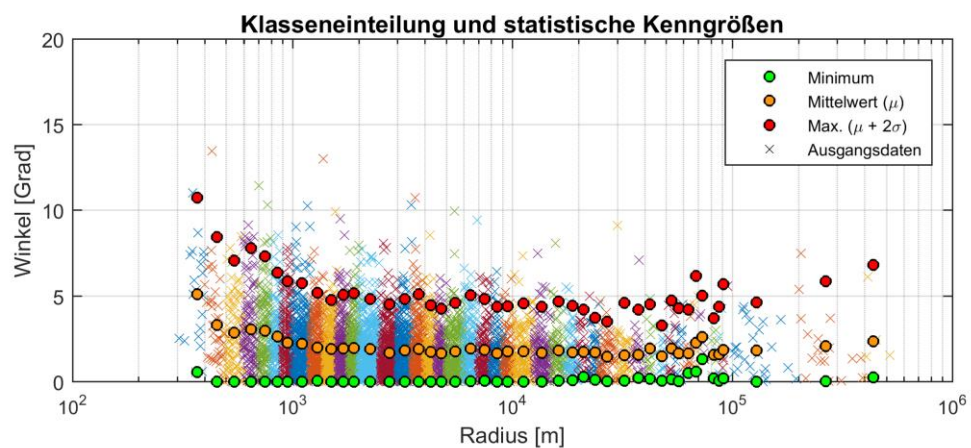
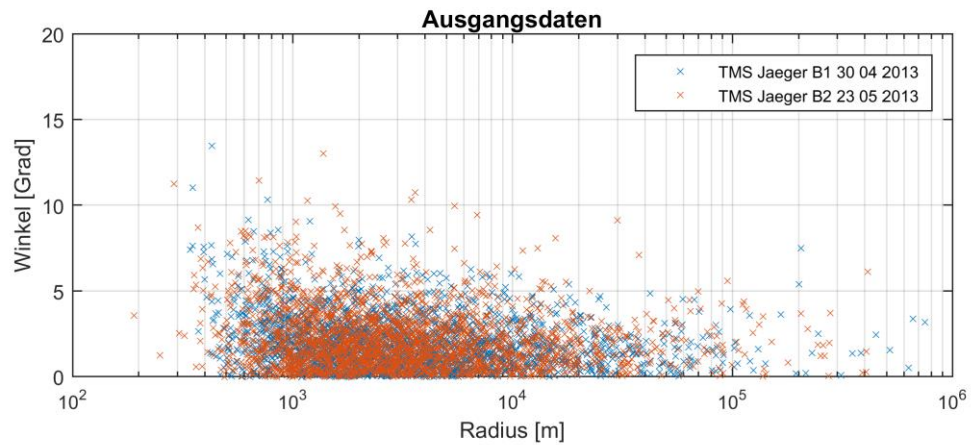
Anmerkung: -



Schiffstyp: TMS

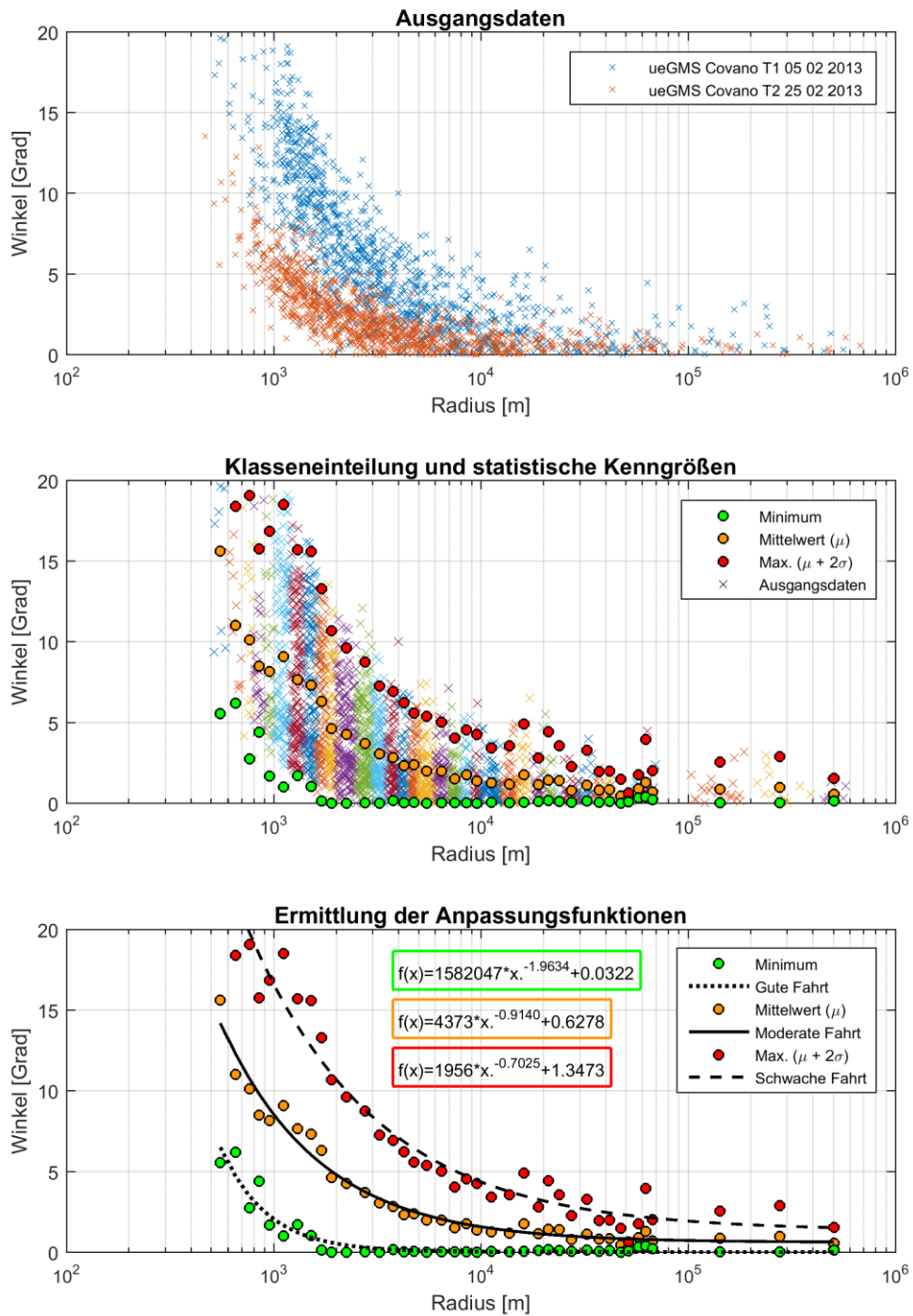
Fahrtrichtung: Berg

Anmerkung: -





Schiffstyp: üGMS  
Fahrtrichtung: Tal  
Anmerkung: -

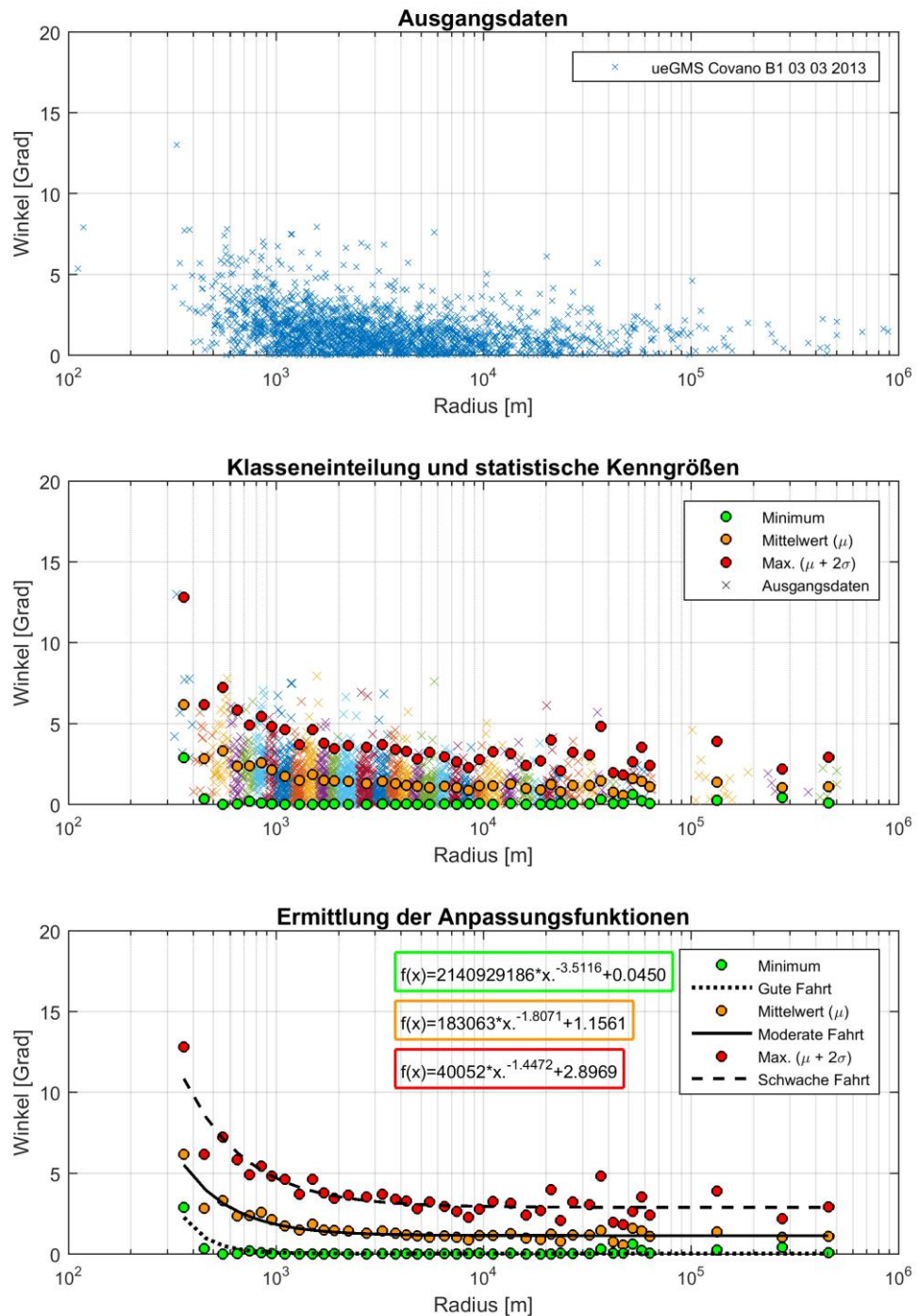




Schiffstyp: üGMS

Fahrtrichtung: Berg

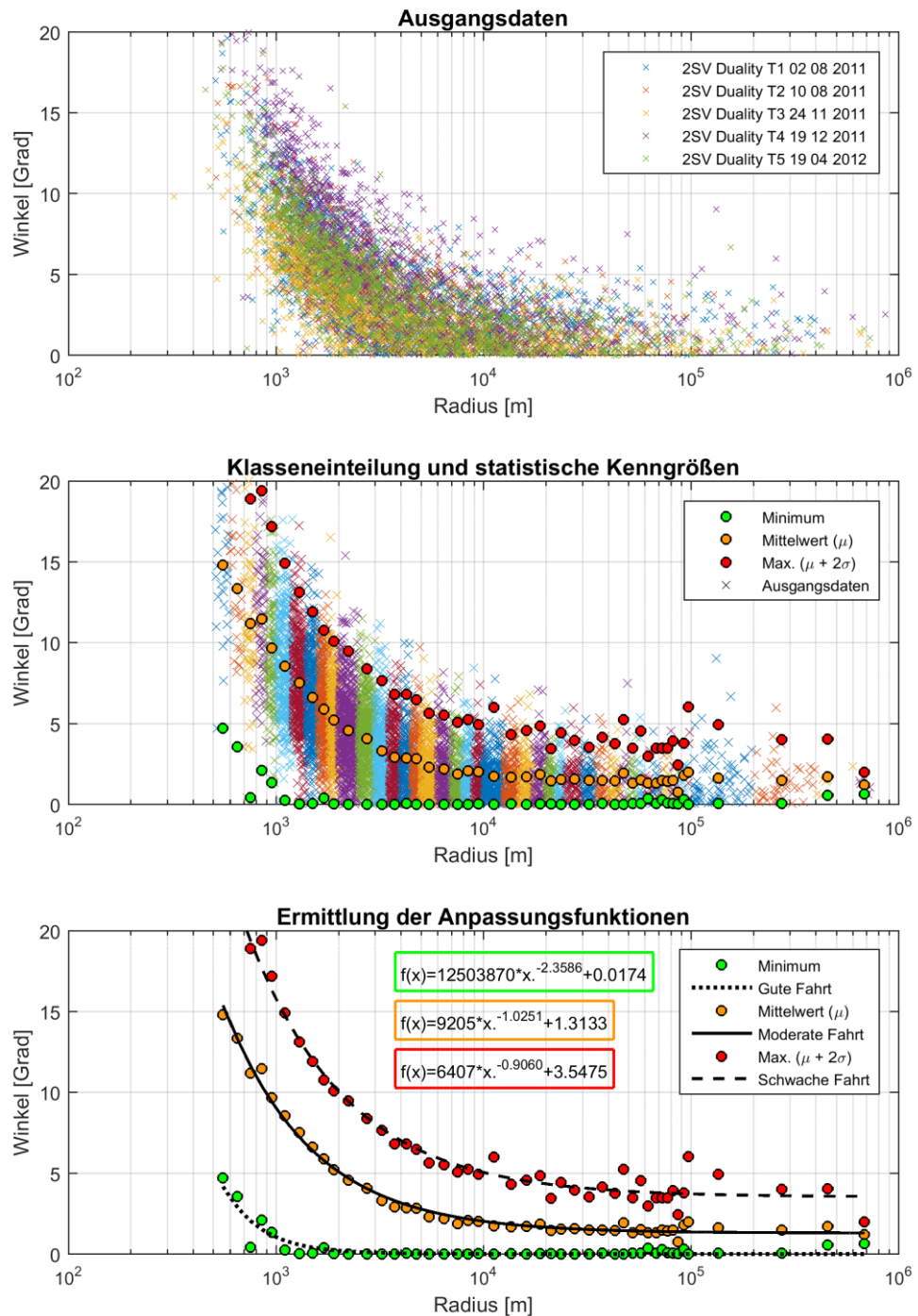
Anmerkung: nur ein üGMS in der Bergfahrt



Schiffstyp: 2SV

Fahrtrichtung: Tal

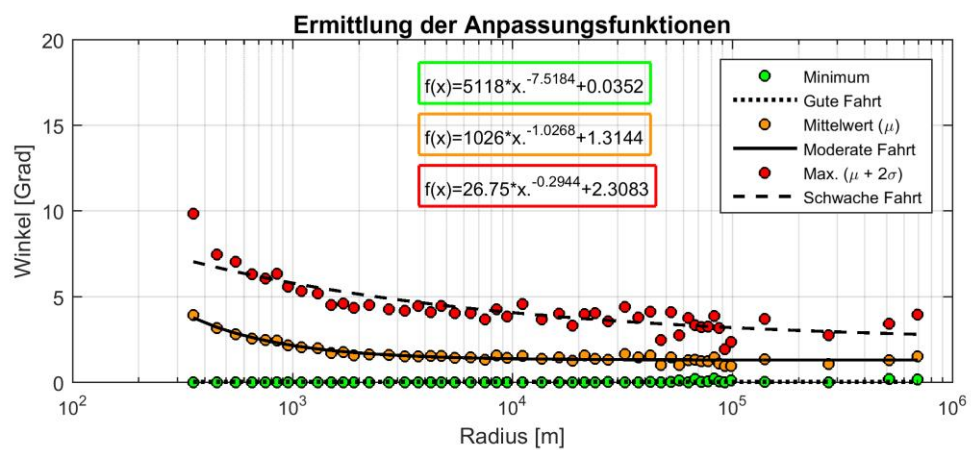
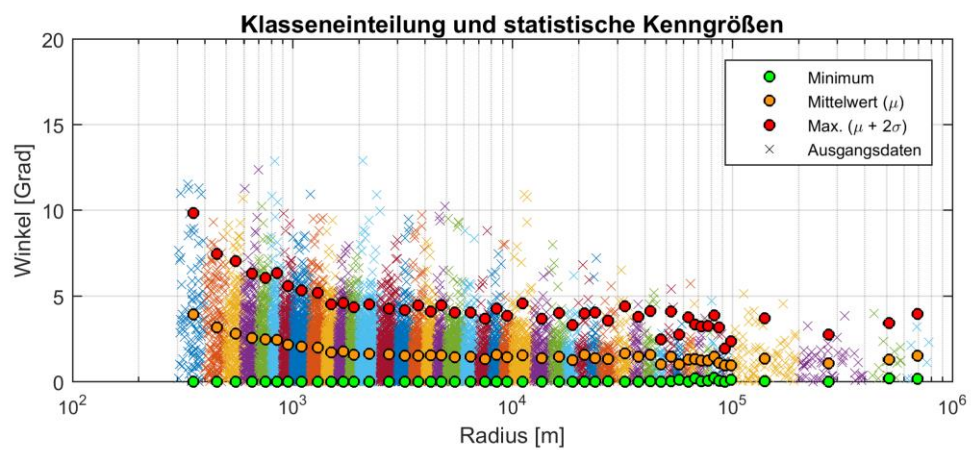
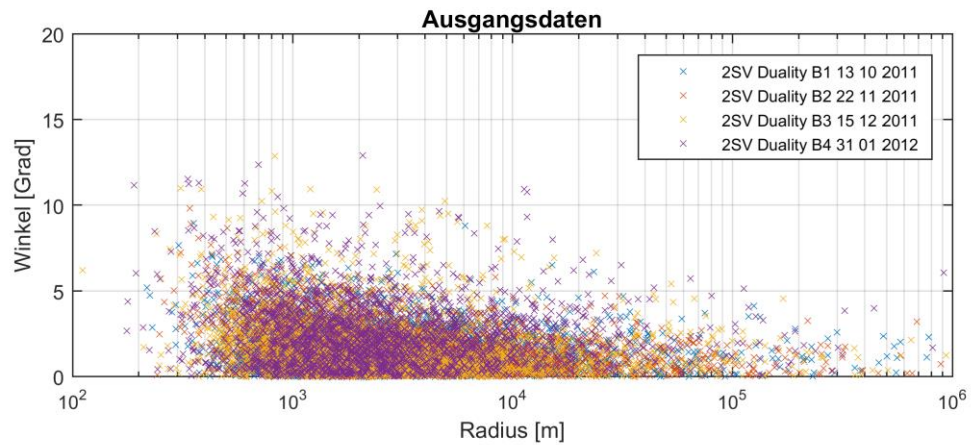
Anmerkung: -



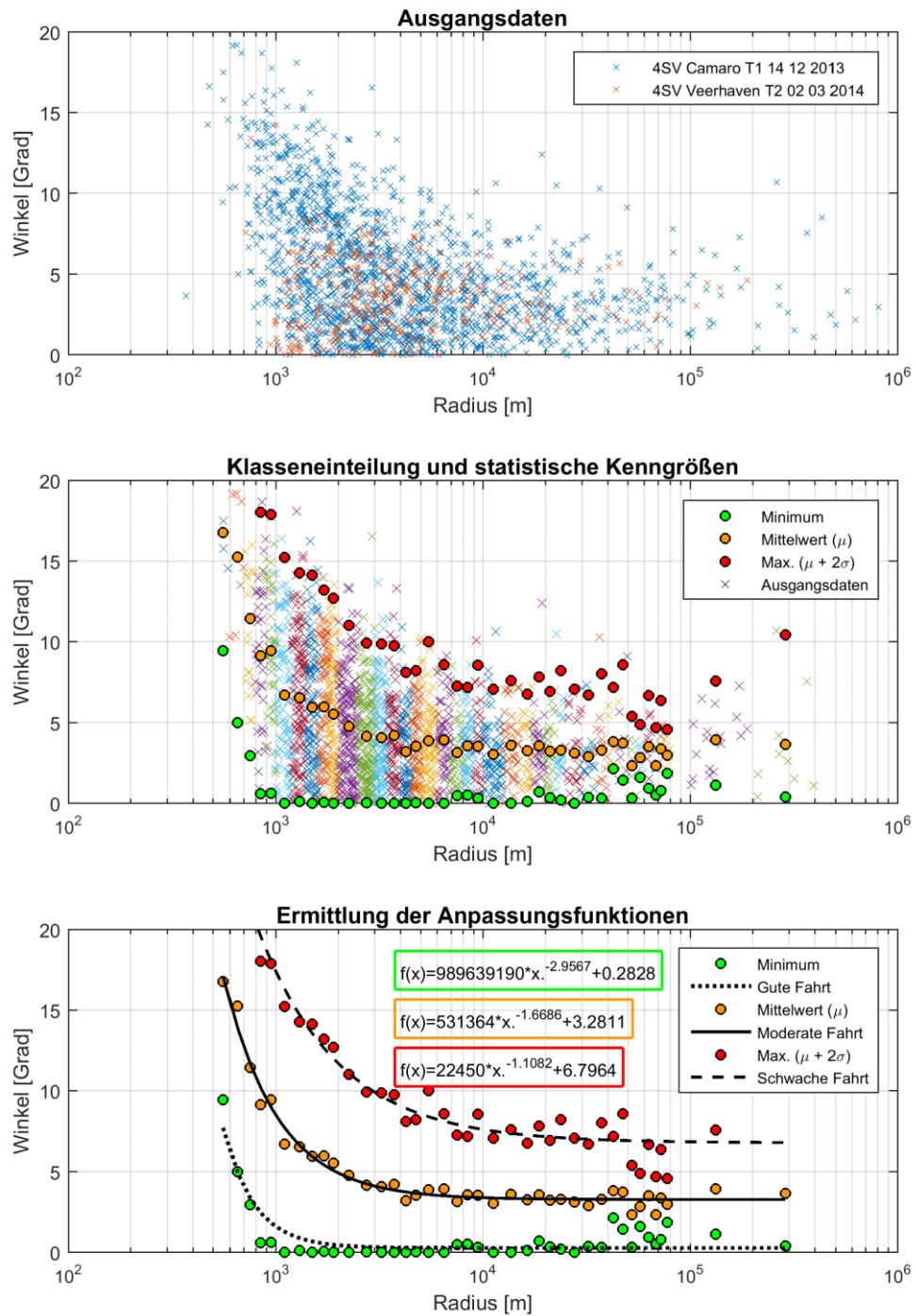
Schiffstyp: 2SV

Fahrtrichtung: Berg

Anmerkung: -



Schiffstyp: 4SV  
Fahrtrichtung: Tal  
Anmerkung: -

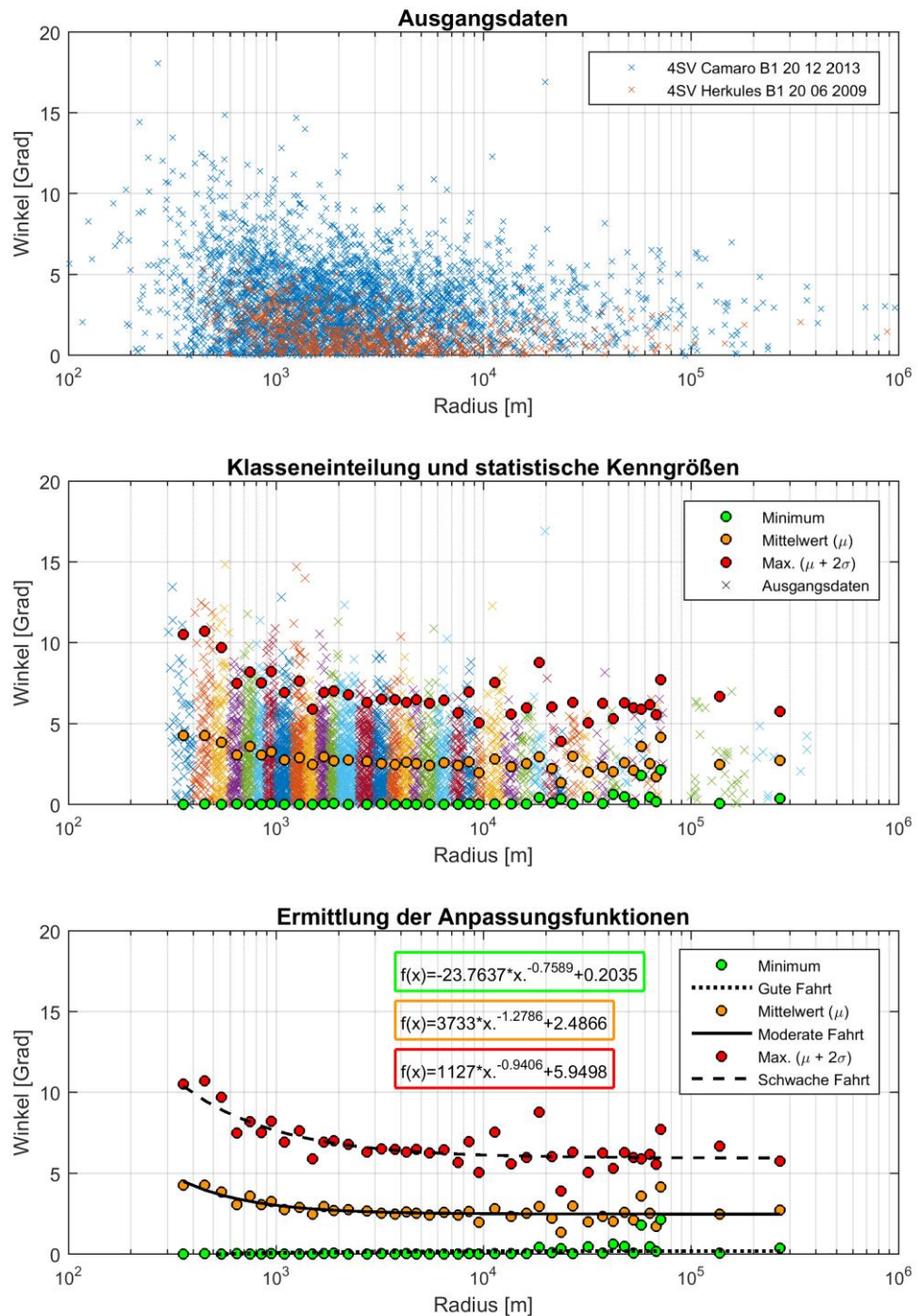




Schiffstyp: 4SV

Fahrtrichtung: Berg

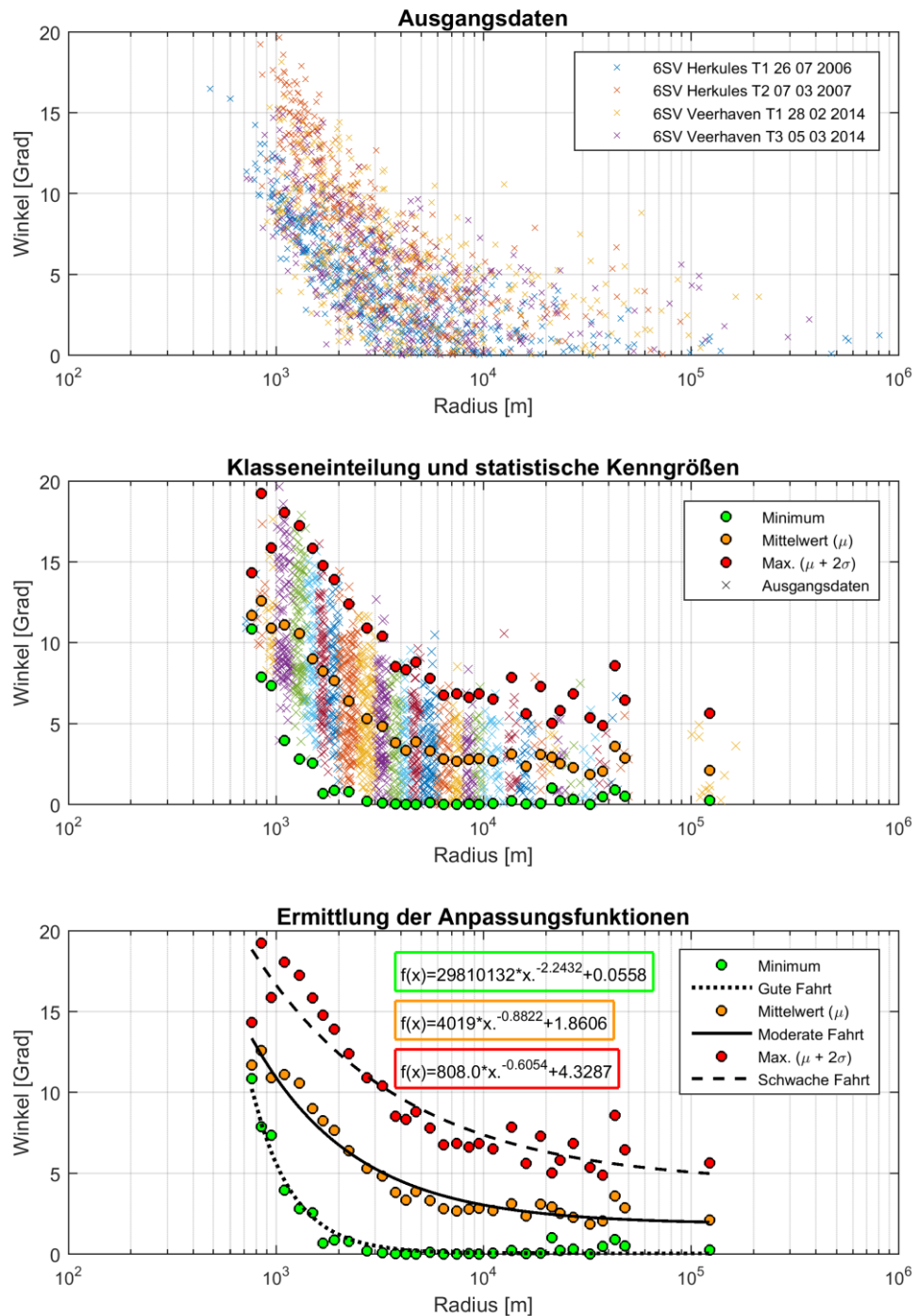
Anmerkung: -



Schiffstyp: 6SV

Fahrtrichtung: Tal

Anmerkung: -

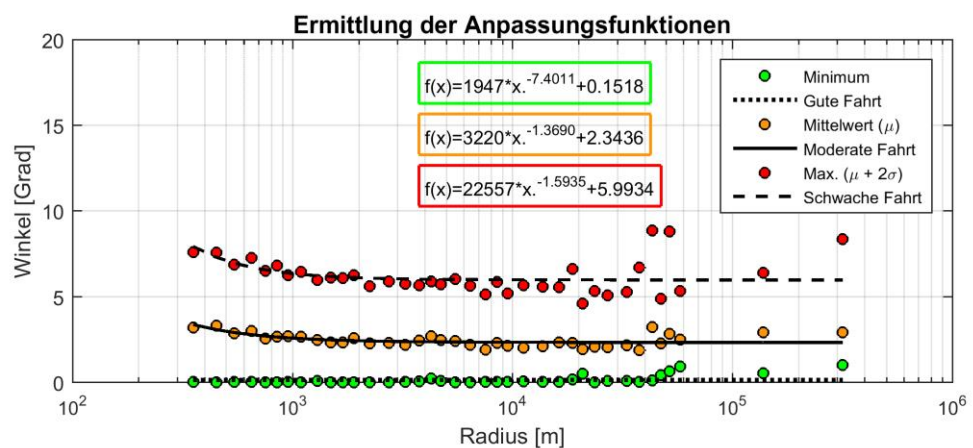
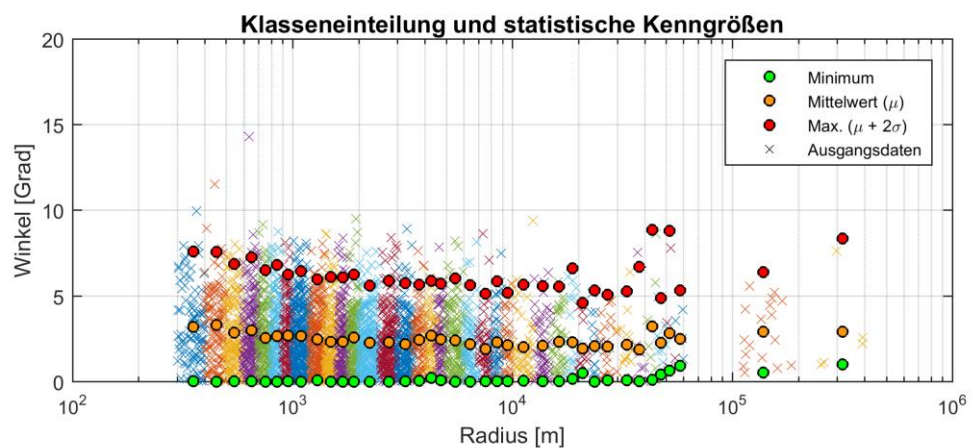
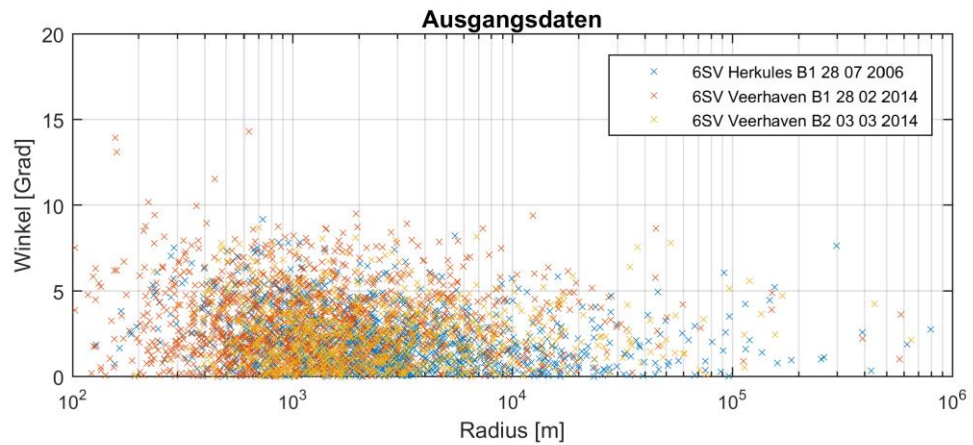




Schiffstyp: 6SV

Fahrtrichtung: Berg

Anmerkung: -





## Anhang 6: Driftwinkel-Radiusbeziehung am Ober- bzw. Mittelrhein

In der Tabelle sind die Koeffizienten, Grade und Konstanten aus den Anpassungsfunktionen für die Driftwinkel-Radiusbeziehung für verschiedene Schiffstypen (TMS, ueGMS, 2SV, 4SV), Fahrtrichtung (Berg oder Tal) und Güte der Fahrt („gute, moderate und schwache Fahrt“) für das Untersuchungsgebiet des Ober- bzw. Mittelrheins zusammenfassend dargestellt. In der Tabelle wurde der 4SV in der Tal- und Bergfahrt ausgegraut, da in der Talfahrt 4SV nur oberhalb Rhein-km 540 zugelassen sind und in der Bergfahrt nur ein 4SV in der Auswertung berücksichtigt werden konnte.

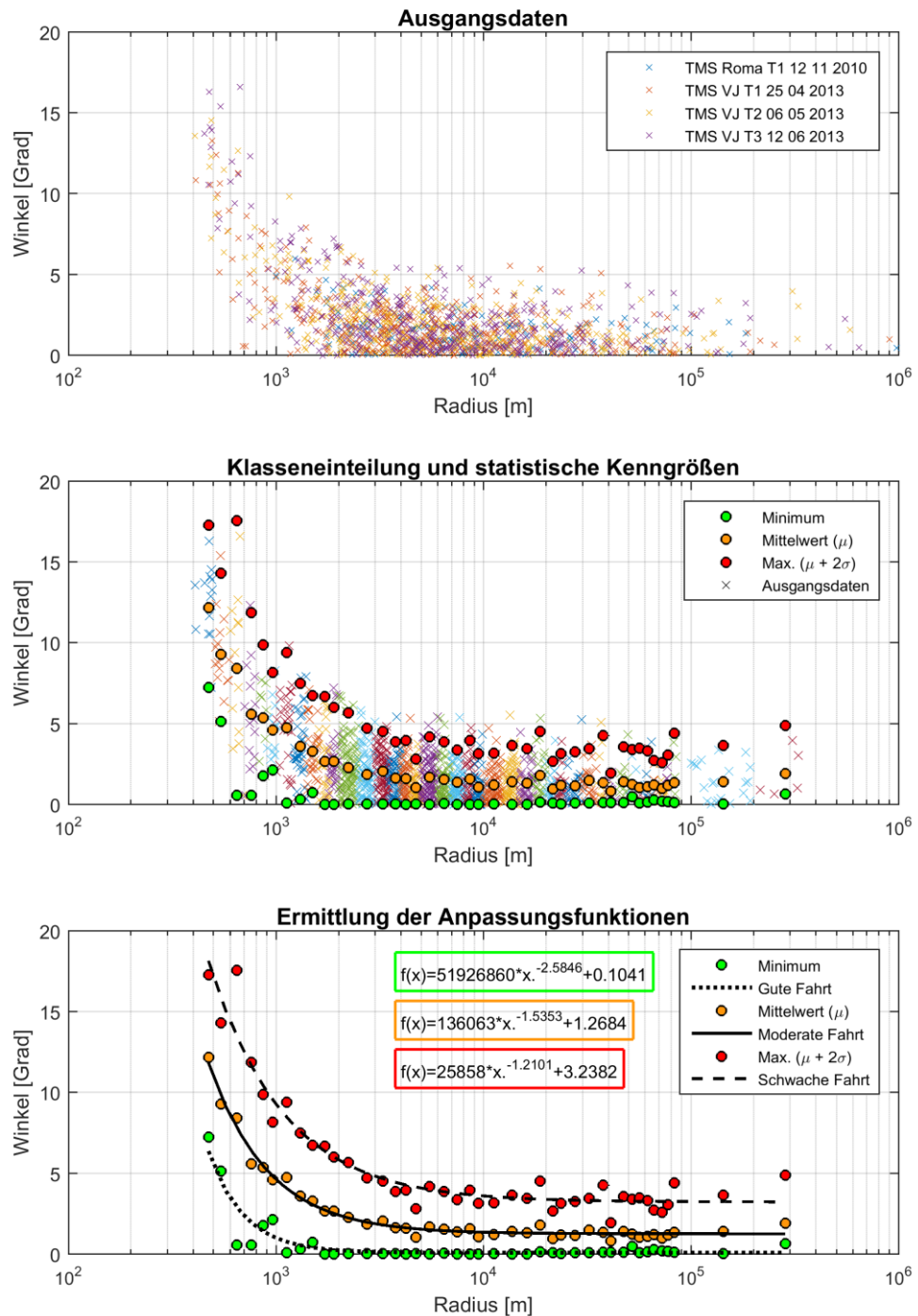
Schiffstyp	Fahrtrichtung (OR-MR)	Funktion $f(x) = a * x^n + c$			Fahrt
		a	n	c	
TMS	Tal	2,5858E+04	-1,2101	3,2382	Schwache Fahrt
ueGMS	Tal	1,6492E+04	-1,0403	2,3785	Schwache Fahrt
2SV	Tal	2,7019E+03	-0,8171	3,6147	Schwache Fahrt
4SV	Tal	1,0821E+04	-1,0150	3,6866	Schwache Fahrt
TMS	Berg	2,9385E+02	-0,6901	3,3368	Schwache Fahrt
ueGMS	Berg	1,0624E+03	-0,8676	3,4720	Schwache Fahrt
2SV	Berg	4,6468E+02	-0,7610	4,4313	Schwache Fahrt
4SV	Berg	1,1692E+01	-0,2373	7,8584	Schwache Fahrt
TMS	Tal	1,3606E+05	-1,5353	1,2684	Moderate Fahrt
ueGMS	Tal	7,4571E+04	-1,3703	1,0413	Moderate Fahrt
2SV	Tal	6,8902E+03	-1,0098	1,4553	Moderate Fahrt
4SV	Tal	3,0906E+05	-1,4985	1,5632	Moderate Fahrt
TMS	Berg	8,5109E+02	-0,9839	1,2602	Moderate Fahrt
ueGMS	Berg	2,6965E+03	-1,1459	1,2824	Moderate Fahrt
2SV	Berg	6,4518E+03	-1,3333	1,8669	Moderate Fahrt
4SV	Berg	3,4871E+00	-0,0329	1,7701	Moderate Fahrt
TMS	Tal	5,1927E+07	-2,5846	0,1041	Gute Fahrt
ueGMS	Tal	5,0836E+07	-2,5526	0,0011	Gute Fahrt
2SV	Tal	4,5678E+05	-1,7450	0,0390	Gute Fahrt
4SV	Tal	1,8927E+08	-2,4098	0,1066	Gute Fahrt
TMS	Berg	3,8225E+04	-2,0870	0,0491	Gute Fahrt
ueGMS	Berg	6,3065E+03	-1,7748	0,0819	Gute Fahrt
2SV	Berg	4,2671E+02	-6,8909	0,1510	Gute Fahrt
4SV	Berg	-3,6462E+01	-0,7103	0,6044	Gute Fahrt

Die Abbildungen zu den Ausgangsdaten, der Klasseneinteilung sowie der Anpassungsfunktionen wie in Kapitel 5.3.4 am Beispiel des Niederrheins beschrieben, sind für die untersuchten Schiffstypen getrennt für Berg und Tal im Untersuchungsgebiet des Ober- bzw. Mittelrheins im Folgenden dargestellt:

Schiffstyp: TMS

Fahrtrichtung: Tal

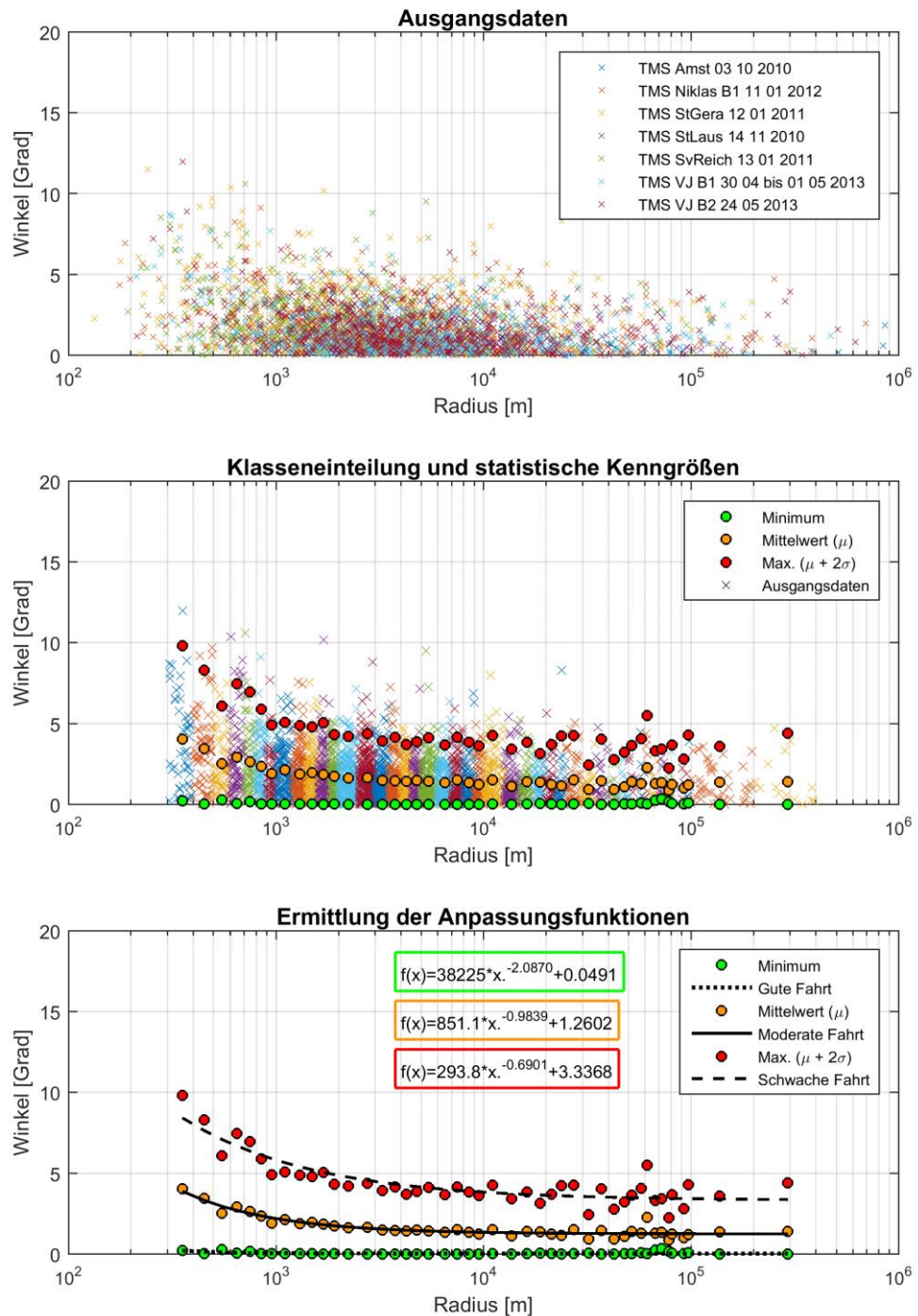
Anmerkung: -



Schiffstyp: TMS

Fahrtrichtung: Berg

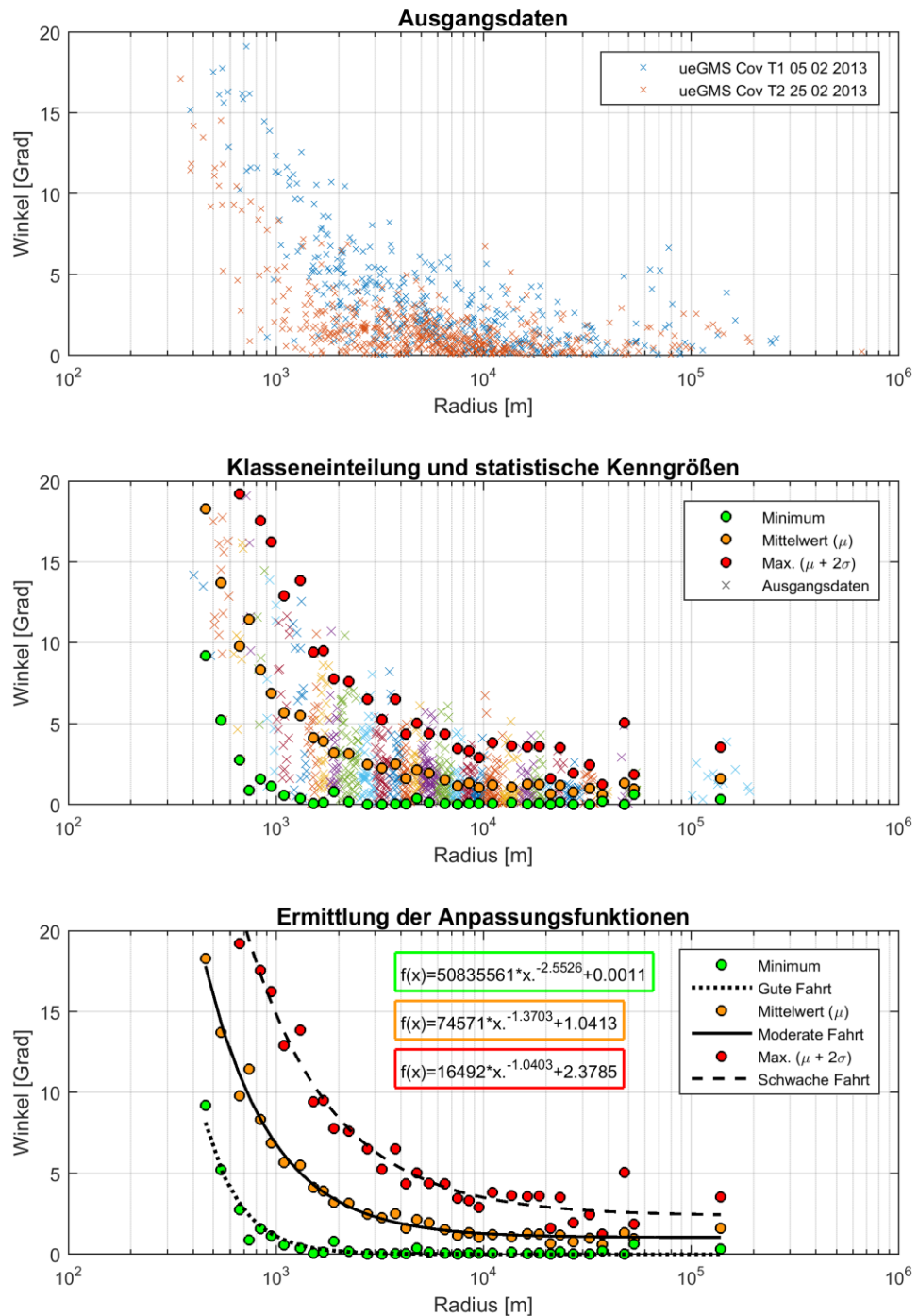
Anmerkung: -



Schiffstyp: üGMS

Fahrtrichtung: Tal

Anmerkung: -

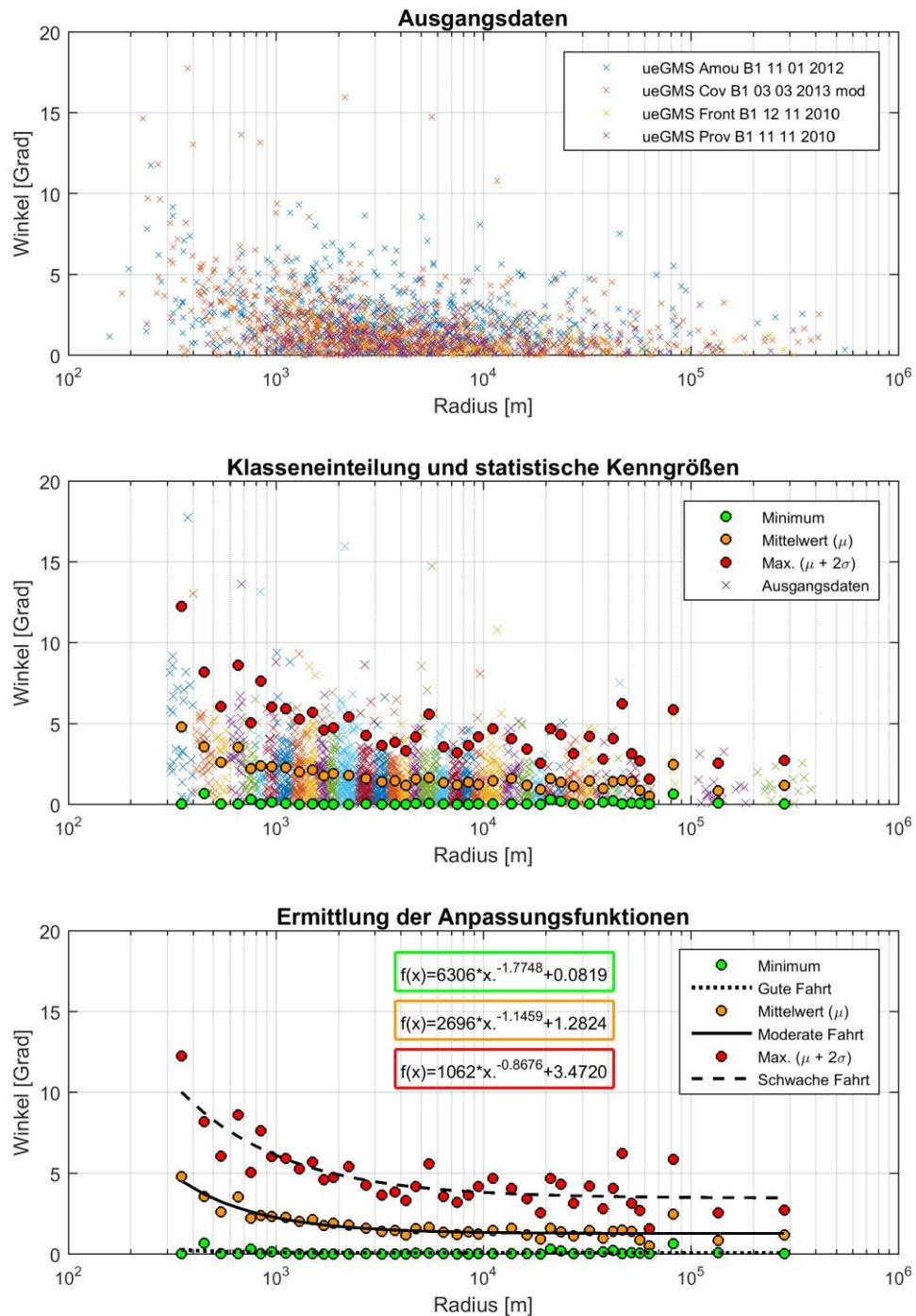




Schiffstyp: üGMS

Fahrtrichtung: Berg

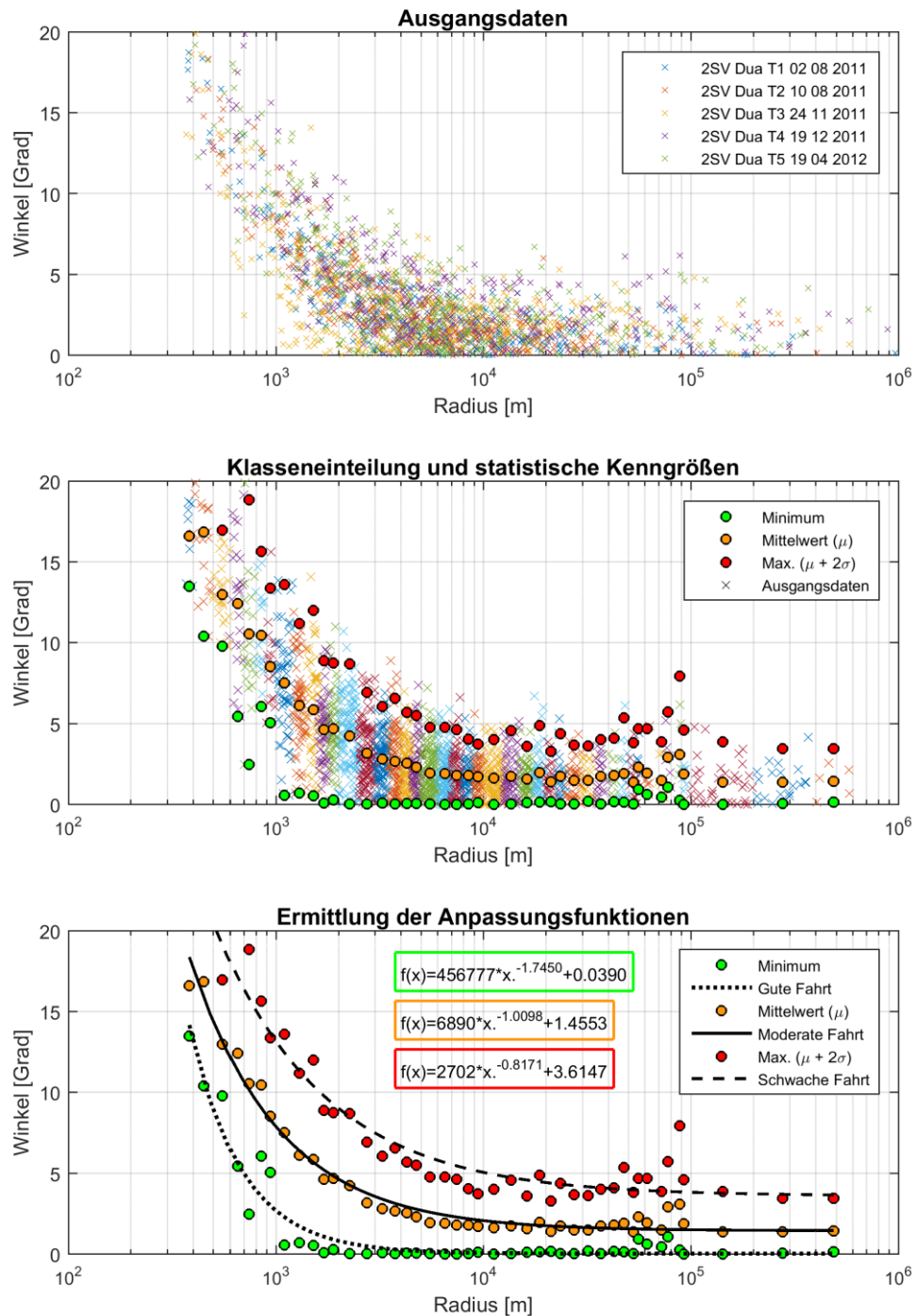
Anmerkung: -



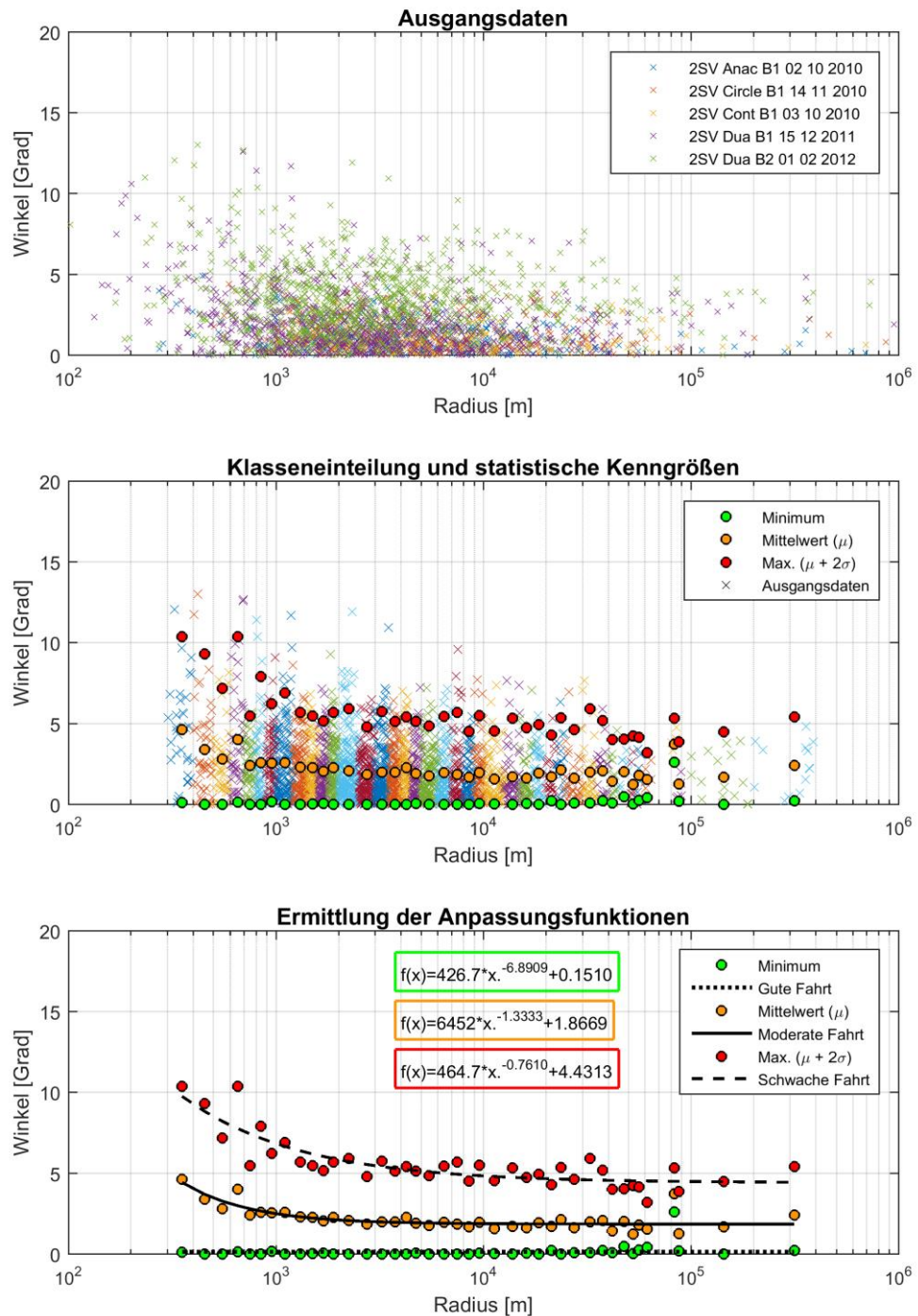
Schiffstyp: 2SV

Fahrtrichtung: Tal

Anmerkung: -



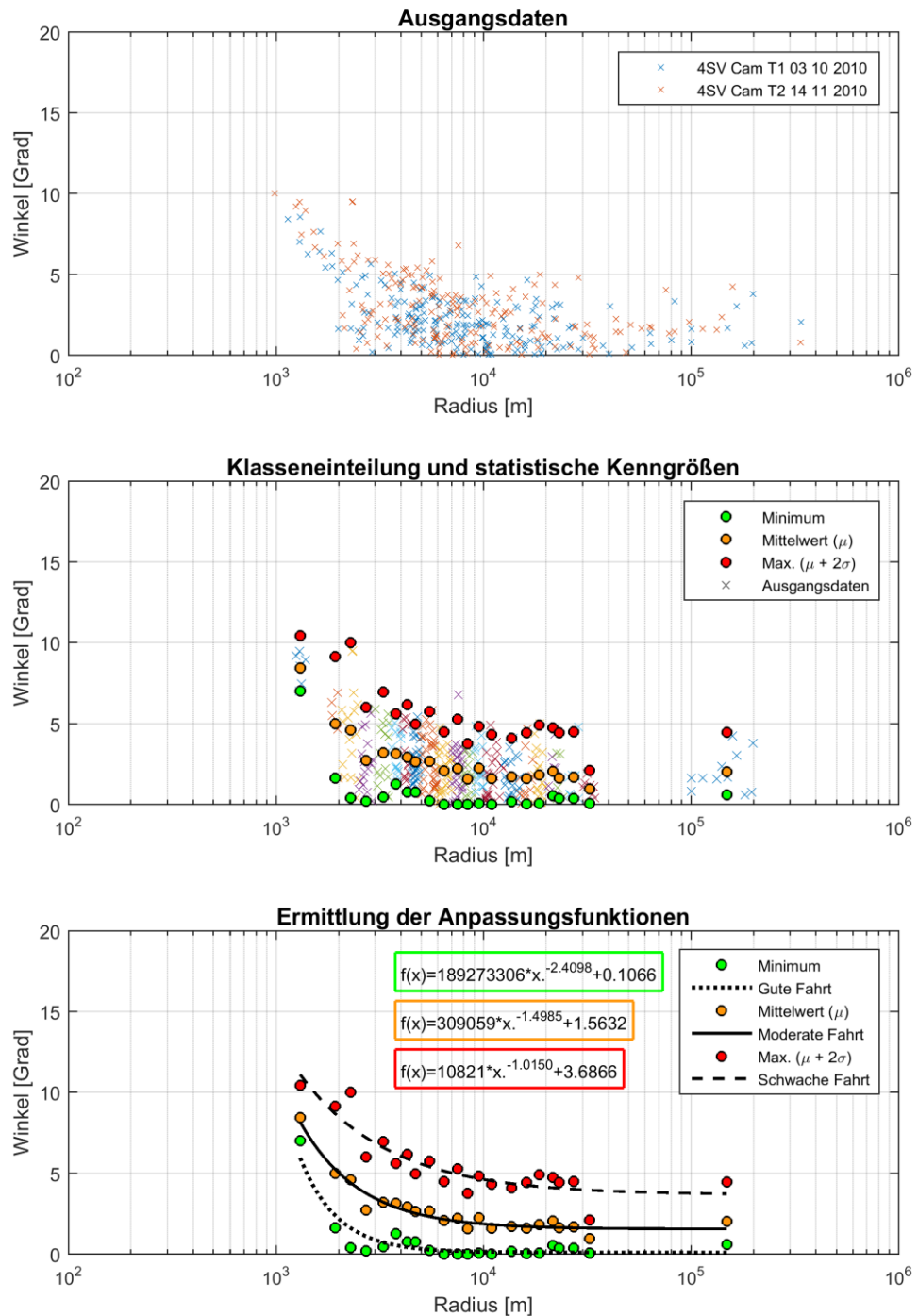
Schiffstyp: 2SV  
 Fahrtrichtung: Berg  
 Anmerkung: -



Schiffstyp: 4SV

Fahrtrichtung: Tal

Anmerkung: 4SV nur oberhalb Rhein-km 540



Schiffstyp: 4SV

Fahrtrichtung: Berg

Anmerkung: nur ein 4SV in der Bergfahrt

